



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E**  
**AMBIENTAL**

**DIÓGENES FERNANDES DOS SANTOS**

**A SECA E SEUS IMPACTOS QUALI-QUANTITATIVOS NA DISPONIBILIDADE**  
**HÍDRICA DE RESERVATÓRIOS NA REGIÃO SEMIÁRIDA**

**NATAL - RN**  
**2020**

DIÓGENES FERNANDES DOS SANTOS

**A SECA E SEUS IMPACTOS QUALI-QUANTITATIVOS NA DISPONIBILIDADE  
HÍDRICA DE RESERVATÓRIOS NA REGIÃO SEMIÁRIDA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Orientadora: Dra. Vanessa Becker

Coorientador: Dr. Jonathan Mota da Silva

**NATAL - RN**

**2020**

DIÓGENES FERNANDES DOS SANTOS

**A SECA E SEUS IMPACTOS QUALI-QUANTITATIVOS NA DISPONIBILIDADE  
HÍDRICA DE RESERVATÓRIOS NA REGIÃO SEMIÁRIDA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Orientadora: Dra. Vanessa Becker

Coorientador: Dr. Jonathan Mota da Silva

**BANCA EXAMINADORA**



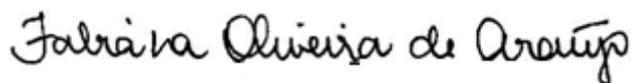
---

**Dra. Vanessa Becker - Orientadora**



---

**Dr. Jonathan Mota da Silva - Coorientador**



---

**Dra. Fabiana Oliveira de Araújo – Examinador UFRN**



---

**Dr. Fabrício Daniel dos Santos Silva – Examinador Externo UFAL**

**Natal/RN, 01 de Abril de 2020**

## **Agradecimentos**

Agradeço primeiramente a Deus Pai, Filho e Espírito Santo por todas as bênçãos concedidas. Até aqui o Senhor me ajudou, dando-me forças para que ao final pudesse colher aquilo que vivemos e conquistamos. Honra e Glória seja dada ao Senhor Jesus Cristo.

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pela concessão da bolsa de mestrado e pelo fomento da pesquisa através do Projeto edital Universal processo n.407783/2016-4, intitulado “*Qualidade da disponibilidade hídrica e proposição de técnicas de mitigação frente às mudanças climáticas na região semiárida brasileira*”.

À minha orientadora, Professora Dra. Vanessa Becker, que me aceitou como orientando; por ser a pessoa e profissional que é. Agradeço pelo conhecimento repassado, pela compreensão, pela disponibilidade, pelos momentos de harmonia. Agradeço também por ter me incentivado a expandir os horizontes do nosso trabalho, me dando oportunidade de investigar ainda mais a fundo as questões hídricas no semiárido. Agradeço por fazer do meu semiárido, tão esquecido por muitos, uma fonte rica para a ciência.

Ao meu coorientador, Dr. Jonathan Mota da Silva, por ter aceitado o desafio de me coorientar e expandir os rumos do trabalho, pela paciência, pela disponibilidade, atenção, pelo bom humor em meio à tensão da realização do trabalho, pelas instruções, e por acreditar no potencial deste trabalho. Um exemplo de cientista e pesquisador.

Aos professores do PPgESA/UFRN (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental da UFRN), pelas contribuições dadas para a minha formação no curso.

À professora Dra. Joana D’arc Freire de Medeiros, cuja amizade ultrapassou os limites da sala de aula, pelas conversas e conselhos dados.

À Dra. Fabiana Araújo pela contribuição dada a mim, removendo minhas dúvidas, transmitindo conhecimento, pela ajuda na realização nas atividades de laboratório e fora dele, pela paciência e dedicação que tem com os membros do grupo ELISA, pela simplicidade e gentileza comigo. Profissional e pessoa admirável.

Ao Dr. Fabrício Daniel dos Santos Silva pela colaboração e sugestões para melhoria no trabalho.

A todas as gerações que fizeram parte do grupo Estudos Limnológicos do Semiárido (ELISA), responsáveis pelas análises laboratoriais e banco de dados das variáveis limnológicas.

A Daniel Jádson, Fernanda Monicelli, e André Luiz pela paciência e ajuda no desenvolvimento das tarefas laboratoriais, pela amizade e pelo comprometimento durante as atividades que envolveram as análises, pelas risadas, pelas brincadeiras, por tudo.

Ao secretário do PPgESA, Pedro, pelos favores prestados ao longo do mestrado, pela amizade, pelas risadas e pela imensa ajuda durante esse ciclo.

À Célia por toda atenção e carinho, por cuidar dos mínimos detalhes.

A Gilmar Bistrot da EMPARN (Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte), que disponibilizou os dados meteorológicos para a minha pesquisa.

A Gorete do IGARN (Instituto de Gestão de Águas do Rio Grande do Norte) que disponibilizou os dados volumétricos para a minha pesquisa.

A Damião Fernandes dos Santos: pai; um homem que me espelha pelo exemplo de honestidade e força de vontade.

À Maria das Neves dos Santos: mãe; minha amiga, mulher abençoada, sertaneja forte que me deu forças em todos os momentos, sendo eles fáceis ou difíceis; a quem quero deixar gravado aqui o meu carinho e amor; serva de Deus, minha mãezinha.

A João Paulo, Maria Eduarda e em especial a Hilka Araújo Santos Lopes: irmã; ajudou-me durante esse ciclo cuidado de mim, quase uma mãe, sempre zelosa; recordei como é ter minha irmã por perto; sem você essa trajetória seria, consideravelmente, mais difícil. Obrigado a todos.

A Jayane Karine Pereira de Araújo: noiva e em breve esposa; minha amiga. Obrigado pelas palavras sábias, pelo companheirismo, pela paciência, pelo bom humor, por compartilhar sua vida ao meu lado, por dividir as alegrias e os momentos difíceis, pelo zelo para comigo, pelo incentivo, por tudo. Registro aqui o meu amor e agradecimento para contigo, meu amor.

A seu José Ferreira Monteiro e dona Alba Coelho Monteiro: amigos; a quem sou imensamente grato pela acolhida e ajuda nessa fase de minha vida.

Deus é bom em todo tempo. Em todo tempo, Deus é bom.

## RESUMO

A seca um fenômeno natural e recorrente, especialmente no semiárido brasileiro, que é vulnerável a variabilidade interanual do clima. Nesse sentido, ecossistemas aquáticos, em especial os continentais, como reservatórios, estão cada vez mais suscetíveis às ações dos eventos extremos (seca severa, chuvas intensas). Sendo assim, as características das regiões semiáridas, como a intermitência dos rios e as altas taxas de evaporação, aliadas à seca prolongada, tendem a aumentar os níveis de nutrientes e o tempo de residência da água de mananciais, favorecendo a condição eutrófica e a inviabilização o uso destes para as atividades humanas. O objetivo deste estudo foi identificar a ocorrência e as características da seca, e como esta se associa com a variabilidade temporal do volume hídrico armazenado nos mananciais da região semiárida. Além disso, o estudo buscou avaliar os impactos da seca prolongada na qualidade da água destes mananciais, verificando se houve alteração de estado trófico dos mesmos durante a ocorrência de eventos de seca. Para tanto, o estudo foi realizado em dois reservatórios de pequeno porte (~ 12,7 e 10,4 km<sup>2</sup>) da bacia do Rio Piancó-Piranhas-Açu, na região semiárida do estado do Rio Grande do Norte. Na identificação dos períodos e características das secas meteorológica e hidrológica foi utilizado o SPI (*Standardized Precipitation Index*), calculado a partir de uma base de dados pluviométricos de 57 anos (1963-2019) (EMPARN), e a anomalia do volume armazenado de água nos reservatórios durante 19 anos (2001- 2019) (IGARN). Os resultados mostraram que o SPI de 36 meses (SPI-36) foi o que melhor se adequou para classificação das secas associadas ao volume hídrico. A correlação de Spearman entre o SPI-36 e volume armazenado mensal dos reservatórios foi de 0,79 e 0,89 para Boqueirão (12,7 km<sup>2</sup>) e Passagem das Traíras (10,4 km<sup>2</sup>), respectivamente ( $p < 0.0001$ ). Durante os anos de 2001 a 2019 ocorreram quatro eventos de secas de diferentes intensidades e durações nos dois reservatórios estudados (2001-2002, 2003, 2007-2008, 2012-2019), sendo que o reservatório Boqueirão apresentou a maior intensidade e frequência, correspondendo ~ de 22 a 11% do total de eventos, enquanto o reservatório de Passagem das Traíras (10,4 km<sup>2</sup>), as secas moderadas, severas e extremas corresponderam ~ 15, 11 e 9%, respectivamente. Por outro lado, a seca hidrológica é mais intensa no reservatório de Passagem das Traíras. A seca mais intensa em ambos os reservatórios durou ~ 8 anos (2012-2019). Na abordagem qualitativa, durante os anos de 2012 a 2019, os resultados indicaram que houve um aumento da clorofila-*a*, condutividade elétrica, pH e turbidez em função da redução do volume hídrico dos reservatórios. Como também, quando comparado os períodos, foi verificado, variação nas concentrações de fósforo total e fósforo reativo dissolvido. Nesse sentido, o estudo, também, demonstrou que o prolongamento da seca impactou na intensificação da eutrofização alterando o estado de trofia de Boqueirão de Parelhas passando de mesotrófico para eutrófico. Para o manancial Passagem das Traíras foi avaliado a permanência do estado eutrófico, mas com impactos mais intensificados, como aumento da biomassa algal confirmando a hipótese do trabalho. Compreender os impactos da seca nos reservatórios, bem como o resultado dela na disponibilidade hídrica, quali-quantitativa, pode ser um meio facilitador para melhor gerenciar os recursos hídricos da região, como também um meio importante na tomada de decisões para atenuar o impacto da seca na população que depende dos reservatórios para o abastecimento humano, pesca, dessedentação animal e outros.

**Palavras-Chave:** índice de precipitação padronizada; seca; saúde pública; segurança hídrica; semiárido.

## ABSTRACT

Drought is a natural and recurring phenomenon, especially in the Brazilian semiarid region, which is vulnerable to interannual climate variability. In this sense, aquatic ecosystems, especially continental ones, as reservoirs, are increasingly susceptible to the actions of extreme events (severe drought, intense rains). Thus, the characteristics of semi-arid regions, such as the intermittency of rivers and high rates of evaporation, combined with prolonged drought, tend to increase nutrient levels and the residence time of water sources, favoring the eutrophic condition and unviability the use of these for human activities. The aim of this study was to identify the occurrence and characteristics of drought, and how it is associated with the temporal variability of the water volume stored in the springs of the semiarid region. In addition, the study sought to assess the impacts of prolonged drought on the water quality of these sources, verifying whether there was a change in their trophic state during the occurrence of drought events. To this end, the study was carried out in two small reservoirs (~ 12.7 and 10.4 km<sup>2</sup>) in the Piancó-Piranhas-Açu River basin, in the semi-arid region of the state of Rio Grande do Norte. To identify the periods and characteristics of the meteorological and hydrological droughts, the SPI (Standardized Precipitation Index) was used, calculated from a 57-year-old rainfall database (1963-2019) (EMPARN), and the anomaly of the stored water volume in reservoirs for 19 years (2001-2019) (IGARN). The results showed that the 36-month SPI (SPI-36) was the best suited for classifying droughts associated with water volume. Spearman's correlation between SPI-36 and monthly stored volume of reservoirs was 0.79 and 0.89 for Boqueirão (12.7 km<sup>2</sup>) and Passagem das Traíras (10.4 km<sup>2</sup>), respectively ( $p < 0.0001$ ). During the years 2001 to 2019, four drought events of different intensities and durations occurred in the two reservoirs studied (2001-2002, 2003, 2007-2008, 2012-2019), with the Boqueirão reservoir showing the highest intensity and frequency, corresponding ~ from 22 to 11% of the total events, while the reservoir of Passagem das Traíras (10.4 km<sup>2</sup>), moderate, severe and extreme droughts corresponded to ~ 15, 11 and 9%, respectively. On the other hand, the hydrological drought is more intense in the reservoir of Passagem das Traíras. The most intense drought in both reservoirs lasted ~ 8 years (2012-2019). In the qualitative approach, during the years 2012 to 2019, the results indicated that there was an increase in chlorophyll-a, electrical conductivity, pH and turbidity due to the reduction in the water volume of the reservoirs. As well, when comparing the periods, it was verified a variation in the concentrations of total phosphorus and dissolved reactive phosphorus. In this sense, the study also demonstrated that the prolongation of drought had an impact on the intensification of eutrophication, changing the trophic status of Boqueirão de Parelhas, changing from mesotrophic to eutrophic. For the reservoir Passagem das Traíras the permanence of the eutrophic state was evaluated, but with more intensified impacts, such as an increase in algal biomass, confirming the hypothesis of the work. Understanding the impacts of drought on reservoirs, as well as the result of it on water availability, qualitative and quantitative, can be a facilitating means to better manage water resources in the region, as well as an important means in decision-making to mitigate the impact of drought in the population that depends on reservoirs for human supply, fishing, animal drinking and others.

**Keywords:** standardized precipitation index; dry; public health; water security; semiarid.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL.....	9
2. CAPÍTULO 1 – ANÁLISE TEMPORAL DA SECA EM RESERVATÓRIOS DO SEMIÁRIDO.....	12
RESUMO .....	12
ABSTRACT.....	13
2.1. Introdução .....	15
2.2. Materiais e Métodos .....	17
2.2.1. Área de Estudo .....	17
2.2.2. SPI e Classificação da Seca.....	18
2.2.3. Anomalia do Volume do Reservatório.....	21
2.2.4. Análises Estatísticas.....	21
2.3. Resultados .....	21
2.4. Discussão .....	29
2.5. Conclusões.....	30
2.6. Referências .....	31
3. CAPÍTULO 2 – MUDANÇA DO ESTADO TRÓFICO DURANTE UM EVENTO DE SECA PROLONGADA EM RESERVATÓRIOS DA REGIÃO SEMIÁRIDA, BRASIL.....	34
3.1. Introdução .....	36
3.2. Materiais e Métodos .....	37
3.2.1. Área de Estudo .....	37
3.2.2. Amostragem .....	38
3.2.3. Análises de Amostras.....	39
3.2.4. Análise de dados .....	39
3.3. Resultados .....	41
3.3.1. Cenário Meteorológico e Hidrológico.....	41
3.3.2. Cenário Limnológico .....	42
3.4. Discussão .....	48
3.5. Referências .....	50
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	56
5. REFERÊNCIAS .....	57

## 1. INTRODUÇÃO GERAL

As mudanças climáticas estão associadas às atividades humanas relacionadas ao aumento de emissões de gases de efeito estufa em nível global, como queimadas e desmatamento, e em nível local com a formação de ilhas de calor urbanas, por exemplo (NOBRE; SAMPAIO; SALAZAR, et al., 2007; FRANCHINI; MANNUCCI, 2015).

Segundo o IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), suportado pelo *World Meteorological Organization* (WMO), se as tendências de crescimento das emissões se mantiverem, os modelos climáticos indicam que poderá ocorrer aquecimento até acima de 6°C em algumas regiões do globo até o final do século XXI. Dentro deste cenário, essas mudanças tornarão ainda mais comuns os eventos extremos, como secas prolongadas e chuvas intensas (IPCC, 2014; COSTA et al., 2020).

As secas são geralmente classificadas como meteorológicas, agrícolas, hidrológicas e socioeconômicas, tendo cada uma as suas especificidades. A seca meteorológica mede o desvio de precipitação em relação a um valor normal e é dependente da região em estudo. A seca agrícola ocorre quando a água disponível no solo não atende ao requerimento hídrico das culturas e dos sistemas agrícolas em geral. A seca hidrológica está associada à redução do volume médio de água das fontes de recursos hídricos superficiais e subterrâneos, como lagos, reservatórios, aquíferos e córregos (WILHITE, 2000).

A Seca Socioeconômica assume as características mais tangíveis associadas aos diferentes tipos de secas, pois agrega o efeito conjunto dos impactos naturais e sociais que resultam da falta de água, devido ao desequilíbrio entre o fornecimento e a procura afetando diretamente as populações. Sendo a seca um fenômeno climático natural e recorrente do clima (WILHITE, 2000), entretanto as mudanças climáticas projetadas tendem a intensificar essa problemática (FRANCHITO; FERNANDEZ; PAREJA, 2014; MARENGO; BERNASCONI, 2015).

A região semiárida localizada no nordeste brasileiro é extremamente vulnerável a mudanças climáticas (MARENGO; TORRES; ALVES, 2016), vivenciando recentemente a seca mais extrema em décadas para a região, entre 2012 e 2019 (CUNHA et al., 2019; ROCHA JÚNIOR et al, 2019). Em um clima mais quente no futuro, a região pode se tornar árida, afetando a agricultura de

subsistência, a disponibilidade de água e a saúde da população (MARENGO; BERNASCONI, 2015).

Eventos de seca prolongada, intensificados pelas mudanças climáticas, afetam negativamente a qualidade da água, uma vez que resultam na diminuição dos níveis de água e aumento da concentração de nutrientes, proporcionando assim, condições propícias ao crescimento fitoplantônico (MOSS et al., 2011). Os impactos da seca sobre a qualidade da água podem ser variáveis e dependentes do tipo de reservatório de água bruta, tipo de clima, localização geográfica, e a combinação de eventos que antecedem, ou acompanham, uma determinada seca (MOSLEY, 2015). Características das regiões semiáridas como a intermitência dos rios, a seca prolongada e as altas taxas de evaporação tendem a aumentar os níveis de nutrientes e o tempo de residência da água dos mananciais, favorecendo a condição eutrófica e a inviabilização do uso destes para as atividades humanas (BRASIL, et al., 2016; MEDEIROS, et al., 2015; FIGUEIREDO; BECKER, 2018).

Fatores hidrológicos e climáticos afetam diretamente as variáveis da qualidade da água de reservatórios (NASELLI-FLORES; BARONE, 2005; SOARES et al., 2012, JEPPESEN et al., 2015), podendo resultar na alteração de estado trófico (NASELLI-FLORES; BARONE, 2003; ROCHA JÚNIOR et al., 2018). Pesquisas na região semiárida têm apresentado como resultado a intensificação da eutrofização devido aos eventos extremos de seca (COSTA et al., 2016; FIGUEIREDO; BECKER, 2018; ROCHA JUNIOR et al., 2018; COSTA et al., 2019).

Para auxiliar na classificação das secas algumas ferramentas são utilizadas, entre elas os índices padronizados de seca, entre os mais conhecidos estão: o índice de precipitação padronizado - SPI (MCKEE et al., 1993); índice padronizado de precipitação e evapotranspiração – SPEI (VICENTE-SERRANO; BEGUERÍA; LÓPEZ-MORENO, 2010; VICENTE-SERRANO, et al., 2014); e o índice de severidade da seca de Palmer – PDSI, que teve o mérito de incorporar os efeitos da evapotranspiração no monitoramento das secas, sendo posteriormente aperfeiçoado (PALMER, 1965; WELLS, et al., 2004; MIKA, et al., 2005). Os índices padronizados de seca representam anomalias de uma situação normal de maneira padronizada.

Em função disso, estes índices permitem comparar valores de seca nas diferentes regiões. Entretanto, uma desvantagem é que a severidade de seca é expressa em termos relativos, enquanto na gestão de recursos hídricos (GRH) são expressos em valores absolutos do déficit de volume (VAN LOON, 2015). Vale ressaltar que os índices de seca padronizada, incluindo aqueles que se concentram na seca hidrológica, tem origem no índice de precipitação padronizada (SPI) (VAN LOON, 2015). Da mesma maneira, os índices de seca meteorológica padronizada (baseados no SPI), calculados em longas escalas de tempo, às vezes são utilizados como aproximação da seca hidrológica (NALBANTIS; TSAKIRIS, 2009; ZHAI et al., 2010; JOETZJER et al., 2013; LI; RODELL, 2014).

Na luz do que é exposto, este estudo tem como objetivo identificar a ocorrência e as características da seca, por meio da análise de diferentes escalas temporais do SPI, e como esta se associa com a variabilidade temporal do volume armazenado nos reservatórios da região semiárida. Além disso, o estudo busca identificar os impactos da seca prolongada na qualidade da água demananciais da região semiárida.

## 2. CAPÍTULO 1 – ANÁLISE TEMPORAL DA SECA EM RESERVATÓRIOS DO SEMIÁRIDO

### RESUMO

A seca é um fenômeno recorrente no Nordeste Brasileiro, em especial na região semiárida que é vulnerável a variabilidade interanual do clima. As secas impactam diretamente os ecossistemas e as culturas agrícolas, através da redução da disponibilidade de água em quantidade e qualidade. Os reservatórios de pequeno e médio porte no semiárido nordestino também são vulneráveis as secas, que têm estado trófico mais desfavorável em consequência da significativa redução dos seus volumes no estabelecimento de uma seca. É amplamente reconhecida a efetividade de índices com base na precipitação no monitoramento e quantificação da intensidade da seca. Contudo, ainda são escassos estudos que associam tais índices de seca com indicadores hídricos, como a variação dos volumes de água armazenados nos reservatórios. Incluir indicadores que caracterizam a seca com os efeitos na variabilidade da água armazenada nos reservatórios é essencial para entender os impactos que a seca causa nessas estruturas hídricas. Assim, o objetivo desse estudo foi identificar a ocorrência e as características da seca, e como esta se associa com a variabilidade temporal do volume armazenado nos reservatórios da região semiárida. Para tal, o estudo foi realizado em dois reservatórios de pequeno porte (~ 12,7 e 10,4 km<sup>2</sup>) da bacia do Rio Piancó-Piranhas-Açu, localizados na região semiárida do Estado do Rio Grande do Norte. Na identificação dos períodos e características das secas meteorológica e hidrológica foi utilizado o SPI (*Standardized Precipitation Index*), calculado a partir de uma base de dados pluviométricos de 57 anos (1963-2019) (EMPARN), e a anomalia do volume armazenado de água nos reservatórios durante 19 anos (2001-2019) (IGARN). Os resultados mostraram que o SPI de 36 meses (SPI-36) foi que melhor se adequou para classificação das secas meteorológicas associadas ao volume hídrico. A correlação de Spearman entre o SPI-36 e volume armazenado mensal dos reservatórios foi de 0,79 e 0,89 ( $p < 0.0001$ ) para os reservatórios de Boqueirão (12,7 km<sup>2</sup>) e de Passagem das Traíras (10,4 km<sup>2</sup>), respectivamente. Durante os anos de 2001 a 2019 ocorreram quatro secas meteorológicas, de diferentes intensidades e durações nos dois reservatórios estudados. A seca mais intensa em ambos os reservatórios durou aproximadamente 8 anos (2012- 2019). De maneira geral, as secas meteorológicas classificadas como leves são mais intensas e frequentes no reservatório de Passagem das Traíras (10,4 km<sup>2</sup>). Estas correspondem em torno de 64% dos eventos de seca meteorológica, contra 56% do reservatório de Boqueirão (12,7 km<sup>2</sup>). Já para seca meteorológica moderada a extrema, o reservatório Boqueirão (12,7 km<sup>2</sup>) apresentou maior intensidade e frequência, correspondendo aproximadamente a 22 a 11% do total de eventos, enquanto para o reservatório de Passagem das Traíras (10,4 km<sup>2</sup>) as secas moderadas, severas e extremas corresponderam a aproximadamente 15, 11 e 9%, respectivamente. Por outro lado,

a seca hidrológica é mais intensa no reservatório de Passagem das Traíras. Na avaliação da frequência de ocorrência das secas hídricas, a faixa correspondente as maiores quedas no volume, aquelas inferiores a 45% do total de eventos, apresentaram um maior déficit na anomalia do volume armazenado no reservatório de Passagem de Traíras. Neste reservatório, a seca mais intensa (2012-2019) provocou um colapso hídrico, onde o volume armazenado foi igual a zero. O uso do SPI foi satisfatório para identificação e avaliação da seca meteorológica e hídrica dos reservatórios juntamente com uso do volume de água armazenado nos reservatórios. Este estudo emprega uma metodologia relevante para o estudo da seca nos reservatórios, bem como apresenta mais uma alternativa para auxiliar na classificação das secas meteorológicas e hidrológicas da região.

**Palavras-chave:** Seca, índice de precipitação padronizada, Reservatório, Semiárido.

### ABSTRACT

Drought is a recurring phenomenon in Northeast Brazil, especially in the semi-arid region that is vulnerable to interannual climate variability. Droughts directly impact ecosystems and agricultural crops, by reducing the availability of water in quantity and quality. Small and medium-sized reservoirs in the northeastern semi-arid are also vulnerable to droughts, which have been in a more unfavorable trophic state as a result of the significant reduction in their volumes in the establishment of a drought. The effectiveness of indices based on precipitation in monitoring and quantifying the intensity of drought is widely recognized. However, there are still few studies that associate such drought rates with water indicators, such as the variation in water volumes stored in reservoirs. Including indicators that characterize drought with the effects on the variability of water stored in reservoirs is essential to understand the impacts that drought has on these water structures. Thus, the objective of this study was to identify the occurrence and characteristics of drought, and how it is associated with the temporal variability of the volume stored in reservoirs in the semi-arid region. To this end, the study was carried out in two small reservoirs (~ 12.7 and 10.4 km<sup>2</sup>) in the Piancó-Piranhas-Açu River basin, located in the semi-arid region of the State of Rio Grande do Norte. To identify the periods and characteristics of the meteorological and hydrological droughts, the SPI (Standardized Precipitation Index) was used, calculated from a 57-year-old rainfall database (1963-2019) (EMPARN), and the anomaly of the stored water volume in the reservoirs for 19 years (2001-2019) (IGARN). The results showed that the 36-month SPI (SPI-36) was the best suited for the classification of meteorological droughts associated with water volume. The Spearman correlation between the SPI-36 and the monthly stored volume of the reservoirs was 0.79 and 0.89 ( $p < 0.0001$ ) for the Boqueirão (12.7 km<sup>2</sup>) and Passagem das Traíras (10.4 km<sup>2</sup>) reservoirs, respectively. During the years 2001 to 2019 there were four meteorological droughts, of different intensities and durations in the two reservoirs studied. The most intense drought in both reservoirs lasted approximately 8 years (2012-2019). In general,

meteorological droughts classified as mild are more intense and frequent in the reservoir of Passagem das Traíras (10.4 km<sup>2</sup>). These correspond to around 64% of the events of meteorological drought, against 56% of the reservoir of Boqueirão (12.7 km<sup>2</sup>). For moderate to extreme meteorological drought, the Boqueirão reservoir (12.7 km<sup>2</sup>) presented greater intensity and frequency, corresponding to approximately 22 to 11% of the total of events, while for the reservoir of Passagem das Traíras (10.4 km<sup>2</sup>) the moderate, severe and extreme droughts corresponded to approximately 15, 11 and 9%, respectively. On the other hand, the hydrological drought is more intense in the reservoir of Passagem das Traíras. In the evaluation of the frequency of occurrence of water droughts, the range corresponding to the largest falls in volume, those less than 45% of the total events, showed a greater deficit in the anomaly of the volume stored in the reservoir of Passagem de Traíras. In this reservoir, the most intense drought (2012-2019) caused a water collapse, where the stored volume was equal to zero. The use of SPI was satisfactory for the identification and evaluation of meteorological and water drought in the reservoirs together with the use of the volume of water stored in the reservoirs. This study employs a relevant methodology for the study of drought in reservoirs, as well as presenting yet another alternative to assist in the classification of meteorological and hydrological droughts in the region.

**Keywords:** Drought, standardized precipitation index, Reservoir, Semi-arid.

## 2.1. Introdução

As mudanças climáticas estão associadas às atividades antropogênicas relacionadas ao aumento de emissões de gases de efeito estufa em nível global, como queimadas e desmatamento, e em nível local com a formação de ilhas de calor urbanas, por exemplo (NOBRE; SAMPAIO; SALAZAR, et al., 2007; FRANCHITO; FERNANDEZ; PAREJA, 2014; FRANCHINI; MANNUCCI, 2015).

Segundo o IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), suportado pelo *World Meteorological Organization* (WMO), se as tendências de crescimento das emissões se mantiverem, os modelos climáticos indicam que poderá ocorrer aquecimento até acima de 6°C em algumas regiões do globo até o final do século XXI. Dentro deste cenário, essas mudanças tornarão ainda mais frequentes os eventos extremos, como secas prolongadas e chuvas intensas (IPCC, 2014; COSTA et al., 2020).

As secas são comumente classificadas como seca meteorológica, seca agrícola, seca hidrológica e seca socioeconômica, tendo cada uma as suas características (VAN LOON, 2015). A seca meteorológica caracteriza-se como um déficit na precipitação e aumento da temperatura do ar, quando comparados com as suas respectivas climatologias. Na grande escala atmosférica, a queda da precipitação está associada a mudanças nos padrões de circulação geral da atmosfera, anomalias de temperatura da superfície dos oceanos e a umidade do solo.. A seca agrícola ocorre quando a água disponível no solo não atende ao requerimento hídrico das culturas e dos sistemas agrícolas em geral. A seca hidrológica está associada à redução do volume médio de água das fontes de recursos hídricos superficiais e subterrâneos, como lagos, reservatórios, aquíferos e córregos (VAN LOON, 2015; WILHITE, 2000).

A Seca Socioeconômica assume as características mais dramáticas associadas aos diferentes tipos de secas, pois agrega o efeito conjunto dos impactos naturais e sociais que resultam da falta de água, devido ao desequilíbrio entre o fornecimento e a procura afetando diretamente as populações. Sendo a seca um fenômeno climático natural e recorrente do clima (WILHITE, 2000), ressalta-se, que as mudanças climáticas projetadas tendem a intensificar essa problemática (FRANCHITO; FERNANDEZ; PAREJA, 2014; MARENGO; BERNASCONI, 2015).

A queda nestas componentes hidrológicas é consequência do alinhamento de

um padrão de aumento na evapotranspiração e redução da precipitação e umidade do solo, que deixa desfavorável a geração de escoamento. Os impactos da seca nas regiões com marcada sazonalidade climática, como é o caso da região semiárida, tende a abranger uma maior área e permanecer por mais tempo, comparada as regiões com menor sazonalidade climática (VAN LOON, 2015). Em geral, a seca traz consequências sócio ambientais e de cunho econômico, como: a redução de oferta de água em centros urbanos, industriais e sistemas de irrigação e a queda na geração de energia elétrica de fonte hidráulica (FERNANDES et al., 2009).

A seca é um fenômeno recorrente no Nordeste Brasileiro, em especial na região semiárida que é vulnerável as variações climáticas interanuais. Essa região apresenta uma alta vulnerabilidade em virtude do seu regime climático e dos impactos já ocasionados pelas mudanças climáticas na região (MARENGO; TORRES; ALVES, 2016), bem como as projeções que apontam para um déficit pluviométrico e um aumento de aridez no próximo século (MARENGO; BERNASCONI, 2015).

Recentemente, o Nordeste brasileiro passou pelos eventos de seca mais severos nos últimos 60 anos, destaca-se a seca plurianual no nordeste (2011-2019) como sendo a seca mais extrema em décadas (CUNHA et al., 2019). Vale salientar que a seca não foi decorrente do fenômeno El Niño, que foi presente, apenas, nos anos de 2015 e 2016 (MARENGO et al., 2017).

Por mais que seja estudada a seca no nordeste brasileiro, este fenômeno ainda requer investigação, devido a sua complexidade e efeito devastador na sociedade. Ademais, as secas impactam diretamente os ecossistemas e as culturas agrícolas, através da redução da disponibilidade de água em quantidade e qualidade, o que ocasiona menores safras, para as culturas, e torna mais propício a ocorrência de incêndios ambientais. Incorporado à intensificação das mudanças climáticas, tornando mais intenso e frequente as variações climáticas, esse fenômeno passa a ter um potencial ainda mais importante no impacto da saúde humana (SALVADOR et al., 2019).

As infraestruturas de armazenamento hídrico também são vulneráveis as secas, especialmente os reservatórios de pequeno e médio porte no semiárido nordestino, que, geralmente, não têm boa qualidade da água em consequência da significativa redução do volume de água no estabelecimento de secas. A construção

de um reservatório é uma medida de mitigação da seca, mas, por si só, não é capaz de acabar com os seus efeitos.

O enfrentamento da seca se dá por medidas de diversas naturezas (CAMPOS, et al., 2008). Neste sentido, o uso de índices climáticos derivados da precipitação tem se mostrado úteis no estudo de caracterização e monitoramento da seca. Diversos estudos reportam a efetividade de índices desenvolvidos com base em variáveis climáticas e hidrológicas, como a precipitação (PALMER, 1965; MCKEE; DOESKEN; KLEIST, 1993), no monitoramento e quantificação da intensidade da seca. Tais índices auxiliam a caracterização da deficiência hídrica das regiões monitoradas (BRITO et al., 2017), sendo os índices de seca meteorológica padronizada (baseados no SPI), calculados em longas escalas de tempo, às vezes utilizados como aproximação da seca hidrológica (NALBANTIS; TSAKIRIS, 2009; ZHAI et al., 2010; JOETZJER et al., 2013; LI; RODELL, 2014).

São escassos estudos que associam os índices de seca derivados de variáveis hidroclimáticas com a variação dos volumes de água armazenados nos reservatórios. Compreender as características da seca é fundamental para o estudo da qualidade das águas em reservatórios, e para o gerenciamento e armazenamento da água com mais eficácia. Incluir indicadores que caracterizam a seca com os efeitos na variabilidade da água armazenada nos reservatórios é essencial para entender os impactos que a seca causa nessas estruturas hídricas essenciais para manutenção da vida no semiárido.

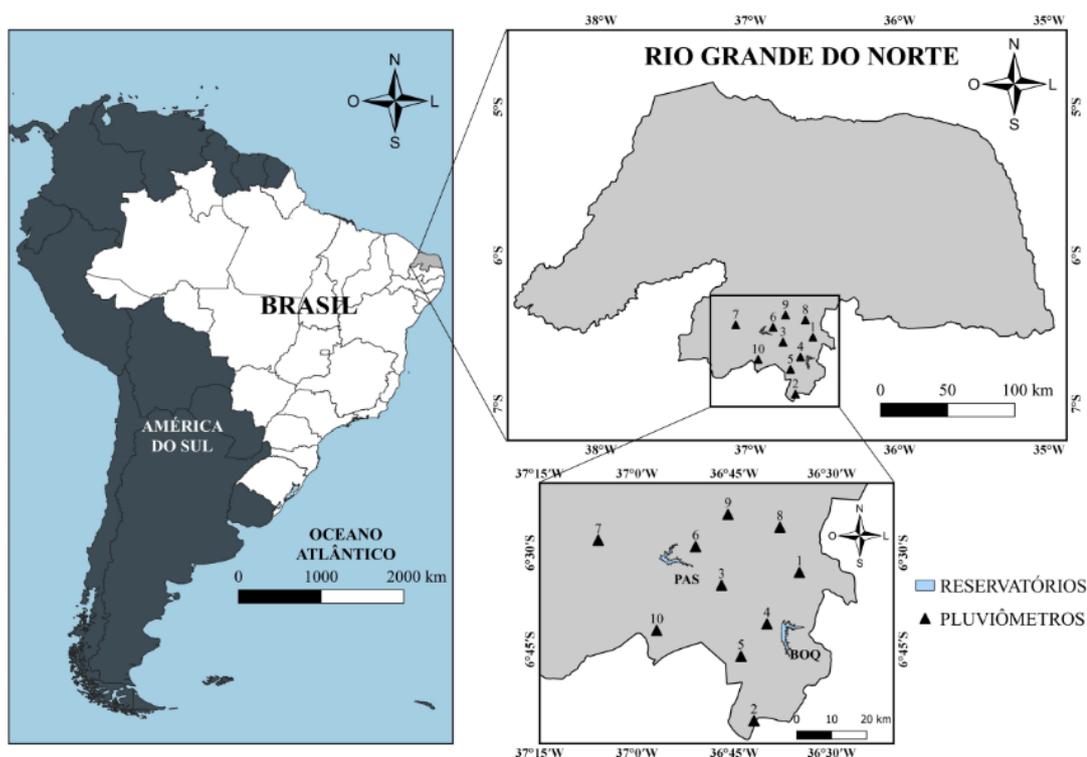
O objetivo deste estudo foi identificar a ocorrência e as características da seca, por meio da análise de diferentes escalas temporais do SPI, e como esta se associa com a variabilidade temporal do volume armazenado nos reservatórios da região semiárida.

## **2.2. Materiais e Métodos**

### *2.2.1. Área de Estudo*

Á área de estudo compreende os reservatórios Boqueirão e Passagem das Traíras, que fazem parte da bacia do Rio Piancó-Piranhas-Açu. Ambos os reservatórios estão situados em uma região conhecida como Seridó no Estado do Rio Grande do Norte, nos municípios de Parelhas e São José do Seridó, respectivamente (ANA, 2016). Os reservatórios Boqueirão (1267,27 ha) e Passagem

das Traíras (1042,90 ha), com capacidade máxima de acumulação de 84.792.119,23 e 49.702.393,65 m<sup>3</sup>, e profundidade máxima de 29 e 25,5 m, respectivamente. Estes reservatórios foram construídos nos anos de 1998 e 1994 e tem como manancial principal o Rio Seridó (SEMARH, 2019). A precipitação anual média na região dos reservatórios é aproximadamente 440 mm, ocorrendo predominantemente durante os meses de fevereiro a maio, e o clima é tropical semiárido (ALVARES et al., 2014; ANA, 2016). Os principais usos dos reservatórios são para abastecimento, dessedentação de animais, irrigação e recreação.



**Figura 1.** Localização Geográfica dos reservatórios de Passagem das Traíras, de Boqueirão e Pluviômetros. (Boq) Reservatório de Boqueirão; (Pas) Reservatório de Passagem das Traíras.

### 2.2.2. SPI e Classificação da Seca

O Índice de Precipitação Padronizada (SPI) foi calculado a partir dos dados de precipitação mensal de pluviômetros fornecidos pela Empresa de Pesquisa Agropecuária do estado do Rio Grande do Norte (EMPARN). A precipitação mensal durante Jan/1963 a Dez/2019, média na área dos reservatórios, foi obtida a partir de uma média aritmética dos pluviômetros localizados a montante e vizinhança dos reservatórios. Neste cálculo foram utilizados a chuva de 10 pluviômetros para obter

a chuva que contribuiu para o escoamento superficial do reservatório de Passagem das Traíras e 5 pluviômetros para o reservatório Boqueirão (Tabela 1; Figura 1).

Com respeito à determinação do SPI, este foi cálculo com auxílio do software livre R. O SPI foi calculado em várias escalas temporais com 12, 24, 36, e 48 meses, nomeadas como SPI 12, SPI 24, SPI 36 e SPI 48, respectivamente. E então analisado em conjunto com a anomalia do volume armazenado de água nos reservatórios fornecidos pelo Instituto de Gestão das Águas do Rio Grande do Norte (IGARN).

Para ambos os reservatórios dados de volume compreendem o período de Mar/2001 até Jul/2019.

As análises dos eventos de seca foram realizadas com uso do índice de precipitação normalizada (SPI, sigla em inglês) proposto por McKee, T.B., N. J. Doesken (1993). O SPI é um índice amplamente utilizado para caracterizar a seca meteorológica em várias escalas de tempo. Essas escalas temporais, no que diz respeito ao seu cálculo, se referem ao acúmulo da precipitação em 1, 2, 3,..., ou até 48 meses consecutivos (SPI-1, SPI-2, SPI-3,..., SPI-48, respectivamente). Quanto aos processos físicos, em curtas escalas de tempo, o SPI está associado ao déficit de precipitação e de umidade do solo, enquanto em períodos mais longos, o SPI pode estar relacionado ao armazenamento de águas em reservatórios nos aquíferos (HAYES; WILHITE; VANYARKHO, 1996; VIAU; VOGT, 2000; MCKEE; DOESKEN, 1993). O SPI é reconhecido com um do índice padrão capaz de detectar secas e que deve estar disponível para quantificar e relatar secas meteorológicas. No Nordeste brasileiro, a comunidade científica disponibiliza produtos operacionais de monitoramento da seca, por exemplo, o “Monitor de Secas” (MARTINS et al., 2015; BRASIL, 2020).

Conceitualmente, o SPI quantifica a precipitação como um desvio padronizado de uma função de distribuição de probabilidade aplicada aos dados de precipitação, que são então ajustados a uma função de distribuição gama. De maneira geral, a probabilidade acumulada de um evento de precipitação é calculada conforme a equação abaixo:

$$G(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \int_0^x x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} dx \quad (2)$$

onde,  $\alpha$  e  $\beta$  são os parâmetros de forma da distribuição, maiores que zero, e  $\Gamma(\alpha)$  é a função gama.

Os dados foram transformados com uso de em uma distribuição normal, e demais procedimentos que são reportados em detalhes em Kumar et al. (2009). Simplificadamente, o SPI é a diferença normalizada da média móvel das precipitações numa escala de tempo (por exemplo, 9 meses) em relação à climatologia deste mesmo período, e pode ser utilizado para comparar regiões com diferentes características climáticas.

**Tabela 1.** Pluviômetros com Dados Disponíveis na EMPARN, Localização e Abrangência Do Pluviômetro em Relação ao Reservatório.

Identificação Pluviômetro	Nome do Pluviômetro	LAT.S	LONG.W	Abrangência Reservatório
1	CARNAÚBA DOS DANTAS (EMATER)	06°33'	36°35'	Boqueirão Passagem das Traíras
2	EQUADOR (PARTICULAR)	06°56'	36°42'	Boqueirão Passagem das Traíras
3	JARDIM DO SERIDÓ (EMATER/PASSAGEM)	06°35'	36°47'	Boqueirão Passagem das Traíras
4	PARELHAS (EMATER)	06°41'	36°40'	Boqueirão Passagem das Traíras
5	SANTANA DO SERIDÓ (EMATER)	06°46'	36°44'	Boqueirão Passagem das Traíras
6	SÃO JOSÉ DO SERIDÓ (ASSOCIAÇÃO USUÁRIOS ÁGUA)	06°29'	36°51'	Passagem das Traíras
7	CAICÓ (BATALHÃO)	06°28'	37°06'	Passagem das Traíras
8	ACARI (PARTICULAR)	06°26'	36°38'	Passagem das Traíras
9	CRUZETA (BASE FÍSICA DA EMPARN)	06°24'	36°46'	Passagem das Traíras
10	OURO BRANCO (SINDICATO TRAB.RURAIIS)	06°42'	36°57'	Passagem das Traíras

A classificação utilizada para especificar a severidade das secas foi proposta por Gummus e Algin (2017), e adaptada para este estudo conforme a Tabela 2.

**Tabela 2.** Classificação de Seca pelo SPI (GUMMUS; ALGIN, 2017), adaptado.

SPI CLASSES	Classificação da Seca
$SPI \leq -2$	Extremamente Seco
$-2 < SPI \leq -1,5$	Severamente Seco
$-1,5 < SPI \leq -1$	Moderadamente Seco
$-1 < SPI \leq 0$	Levemente Seco

### 2.2.3. Anomalia do Volume do Reservatório

No cálculo da anomalia do volume (percentual) dos reservatórios foi calculado o volume médio mensal de toda série histórica, para cada reservatório. Posteriormente, para cada mês foi realizado o cálculo a seguir:

$$Anomaly_{(month)} = \frac{V_{(month)} - VM_{(month)}}{VolResMAX} \times 100 \quad (1)$$

Sendo, a  $Anomaly_{(month)}$  é a diferença entre o Volume do mês ( $V_{(month)}$ ) e Volume médio ( $VM_{(month)}$ ) de cada mês calculado a partir de toda série histórica, ou seja, o volume climatológico, e por fim, dividido pelo Volume Máximo do Reservatório ( $VolResMAX$ ) em questão.

### 2.2.4. Análises Estatísticas

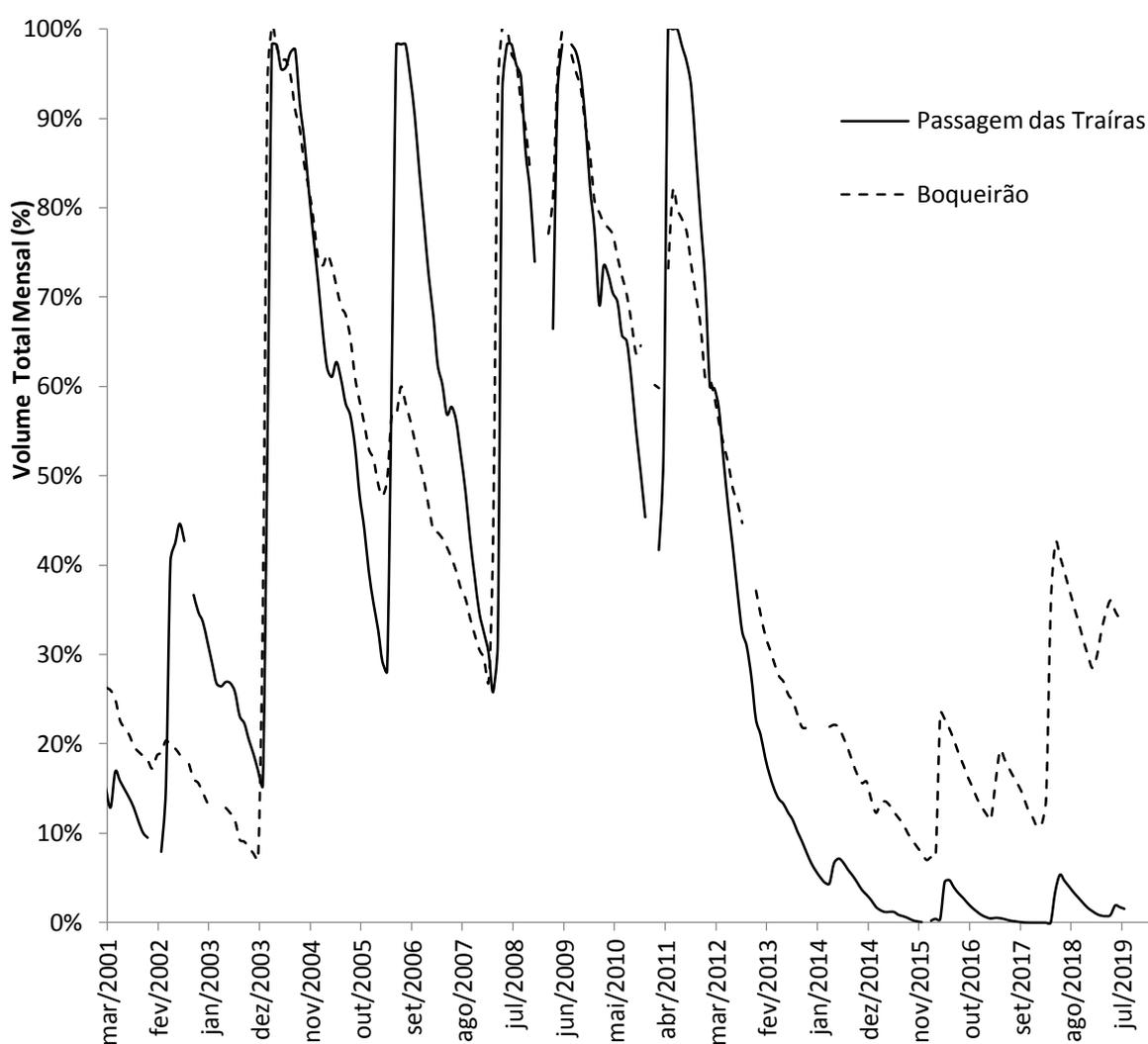
A fim de verificar a correlação entre as diferentes escalas temporais de SPI, variação volumétrica e precipitação acumulada em diferentes escalas temporais foi realizado a correlação não paramétrica de Spearman  $p < 0,0001$ .

A análise estatística foram desenvolvida com auxílio do Software Livre R.

## 2.3. Resultados

O período de estudo foi subdividido em função dos dados existentes de volume hídrico dos reservatórios Boqueirão (Mar/2001 a Jul/2019) e Passagem das

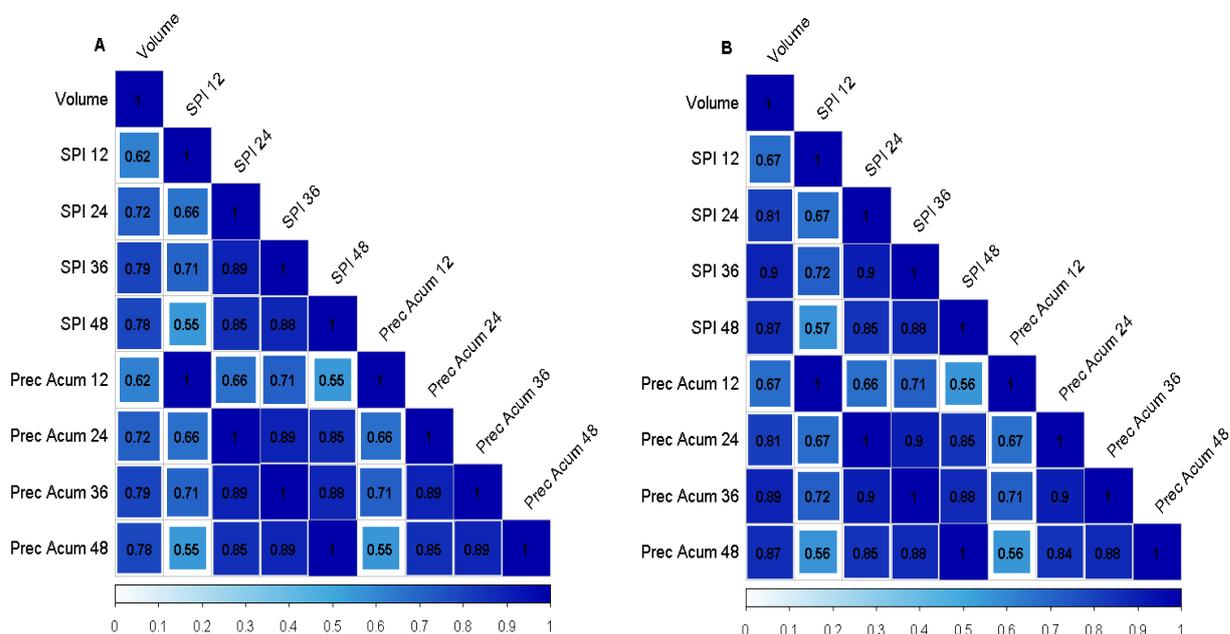
Traíras (Mar/2001 a Jul/2019). Embora a série dos volumes dos reservatórios não seja extensa quanto à série de precipitação, esta contempla aspectos da variabilidade hidroclimática dos reservatórios, passando por eventos de considerável escassez e extravasamento (ou o nível máximo). De acordo com a série dos volumes, percebe-se que os dois reservatórios passaram por eventos de máxima capacidade de armazenamento e por eventos de colapso, chegando a praticamente secar, como observado no reservatório de Passagem das Traíras em Jan/2018, onde o volume correspondeu a 0,0017% da capacidade máxima (Figura 2).



**Figura 2.** Gráfico Volume (%) vs Tempo para os Reservatórios de Passagem das Traíras e Boqueirão.

De maneira geral, a correlação de Spearman do volume armazenado mensalmente no reservatório Boqueirão, aumentou com a escala temporal de 12 para 48 meses, tanto para a precipitação, quanto para o SPI (Figura 3 A; Tabela 3). As correlações para as escalas temporais de 12-48 meses entre o volume armazenado mensal *vs* precipitação e o volume armazenado mensal *vs* SPI, variaram de 0,62 a 0,79 e 0,62 a 0,79, respectivamente. A escala temporal de 36 meses foi a que apresentou a maior correlação com o volume armazenado mensalmente, indicando valores iguais a, 0,79 e 0,79, para o volume armazenado mensal *vs* precipitação acumulada e volume armazenado mensal *vs* SPI, respectivamente.

Semelhantemente, o mesmo padrão de correlação foi verificado no reservatório de Passagem de Traíras, onde precipitação acumulada e o SPI, ambos de 36 meses, apresentaram a maior correlação com volume armazenado mensal, com correlações iguais a 0,89 e 0,90, respectivamente (Figura 3B; Tabela 3). Este reservatório apresentou índices de correlação superiores aos encontrados no Reservatório Boqueirão, em todas as escalas verificadas.



**Figura 3.** Gráfico de Correlação de Spearman do Volume dos Reservatórios, SPI MM e Precipitação Acumulada MM. (A) Reservatório de Boqueirão, (B) Reservatório de Passagem das traíras.

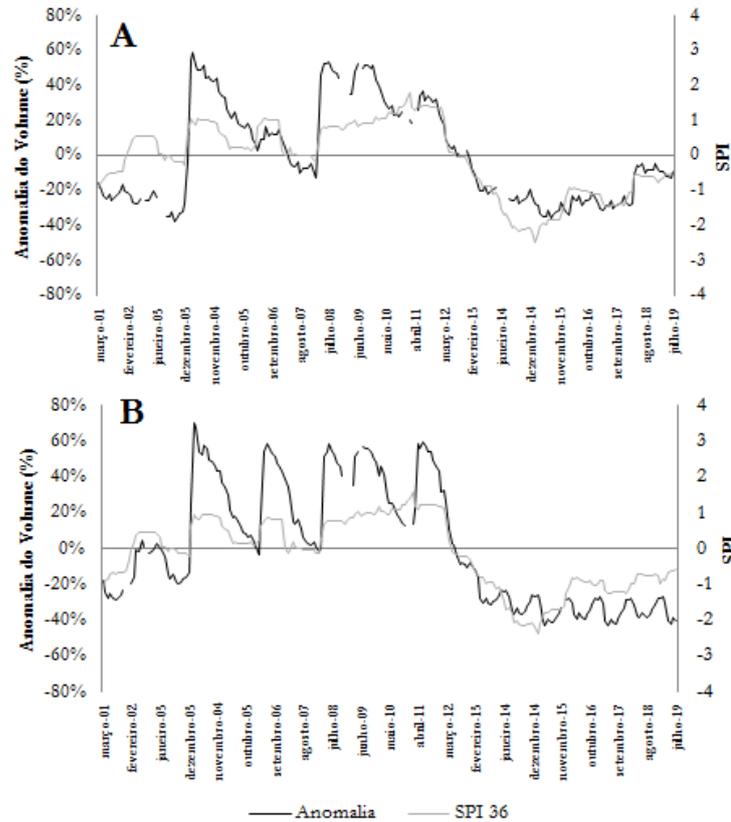
**Tabela 3.** Análise de Correlação de Spearman do Volume dos Reservatórios, SPI MM e Precipitação Acumulada MM. Significância  $p < 0,0001$ .

Variáveis	Volume	SPI 12	SPI 24	SPI 36	SPI 48	P.Acum 12	P.Acum 24	P.Acum 36	P.Acum 48
Volume	1,00	0,67	0,81	0,90	0,87	0,67	0,81	0,89	0,87
SPI 12	0,62	1,00	0,67	0,72	0,57	1,00	0,67	0,72	0,56
SPI 24	0,72	0,66	1,00	0,90	0,85	0,66	1,00	0,90	0,85
SPI 36	0,79	0,71	0,89	1,00	0,88	0,71	0,90	1,00	0,88
SPI 48	0,78	0,55	0,85	0,88	1,00	0,56	0,85	0,88	1,00
P.Acum 12	0,62	1,00	0,66	0,71	0,55	1,00	0,67	0,71	0,56
P.Acum 24	0,72	0,66	1,00	0,89	0,85	0,66	1,00	0,90	0,84
P.Acum 36	0,79	0,71	0,89	1,00	0,88	0,71	0,89	1,00	0,88
P.Acum 48	0,78	0,55	0,85	0,89	1,00	0,55	0,85	0,89	1,00

**Reservatórios**

Boqueirão	Passagem das Traíras
-----------	----------------------

No período de estudo (2001-2019) se estabeleceram 4 períodos de seca meteorológica e 3 períodos de seca hídrica em ambos os reservatórios. A seca mais severa se estabeleceu no término do ano de 2011 e permaneceu até Jul/2019. Nesse período o déficit hídrico foi aproximadamente de 40 e 30% nos reservatórios de Passagem de Traíras e Boqueirão, respectivamente.



**Figura 4** Série temporal da anomalia do volume (%) e SPI-36 para os reservatórios: (A) Boqueirão e (B) Passagem das Traíras.

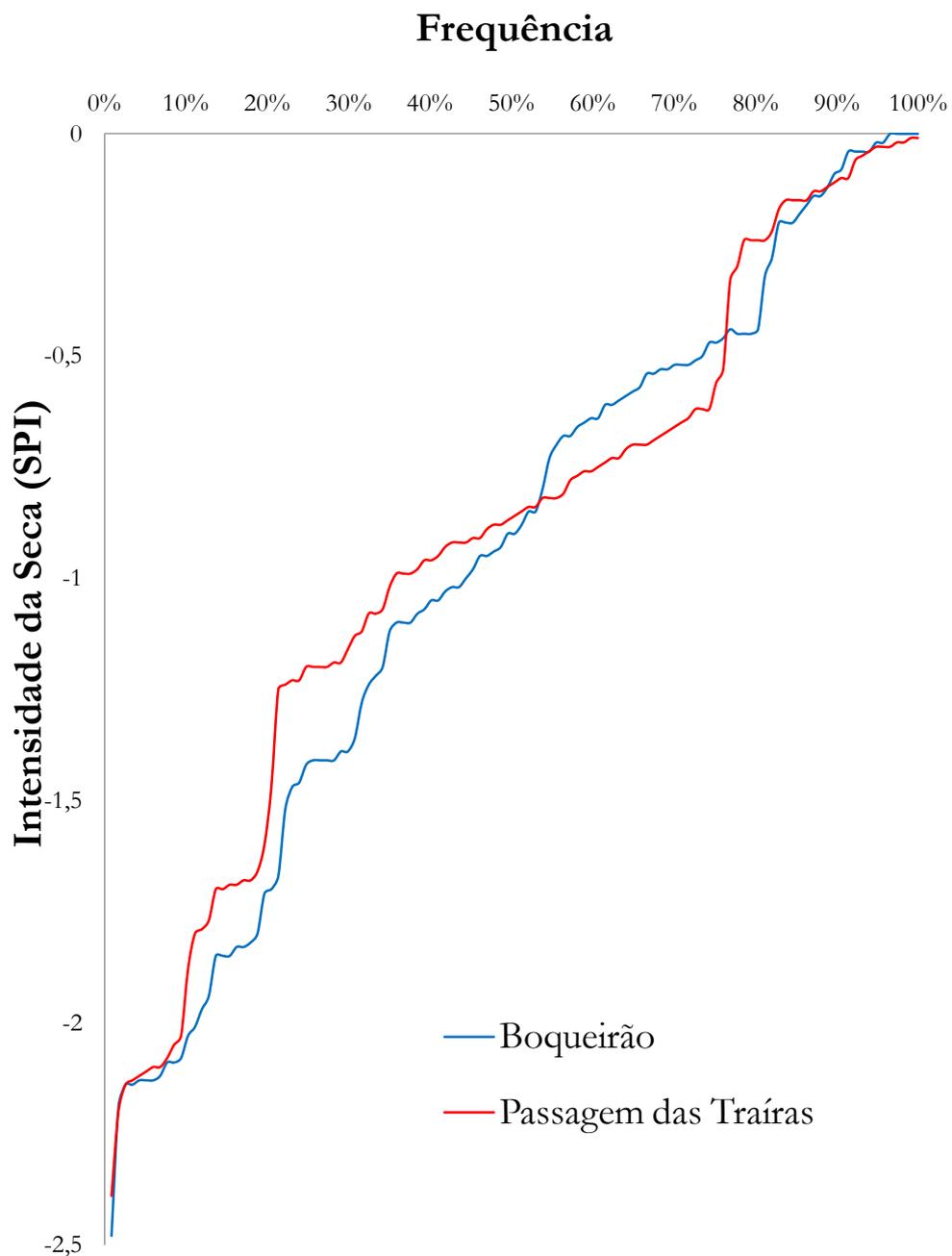
Nos quatro períodos de seca ocorridos no reservatório Boqueirão, as três primeiras secas (Mar/2001-Set/2008) foram secas de leve intensidade, com SPI levemente negativos (-0,16 a 0) (Tabela 4). Agora, no último período ocorreu uma seca extrema, com duração de ~ 8 anos (Ago/2012- Jul/2019), onde o SPI atingiu um mínimo de -2,48 (Figura 4-A ; Tabela 4).

De modo geral, o reservatório de Passagem das Traíras passou pelos mesmos episódios de seca meteorológicas, contudo, a primeira seca avaliada (Mar/2001-Jan/2002) foi de intensidade moderada a leve (SPI atingiu um mínimo de -1,08), e a última seca, se estabeleceu três meses antes, Mai/2012, do que a seca no reservatório Boqueirão (Figura 4-B ;Tabela 4).

**Tabela 4.** Classificação das secas meteorológicas ocorridas durante Mar/2001 a Jul/2019 na região que compreende os reservatórios de Boqueirão e Passagem das Traíras.

<b>Boqueirão</b>			
Período da Seca	Intensidade	SPI	
		Máx	Min
Mar/2001 a Jan/2002	Seca Leve	-0,12	-0,9
Abr/2003 a Dez/2003	Seca Leve	-0,02	-0,28
Set/2007 a Fev/2008	Seca Leve	0,00	-0,16
Ago/2012 a Jul/2019	Seca Leve a Extrema	-0,04	-2,48
<b>Passagem das Traíras</b>			
Mar/2001 a Jan/2002	Seca Leve a Moderada	-0,06	-1,08
Jul/2003 a Dez/2003	Seca Leve	-0,01	-0,22
Jan/2007 a Mar/2007	Seca Leve	-0,01	-0,15
Jul/2007 a Fev/2008			
Mai/2012 a Jul/2019	Seca Leve a Extrema	-0,1	-2,39

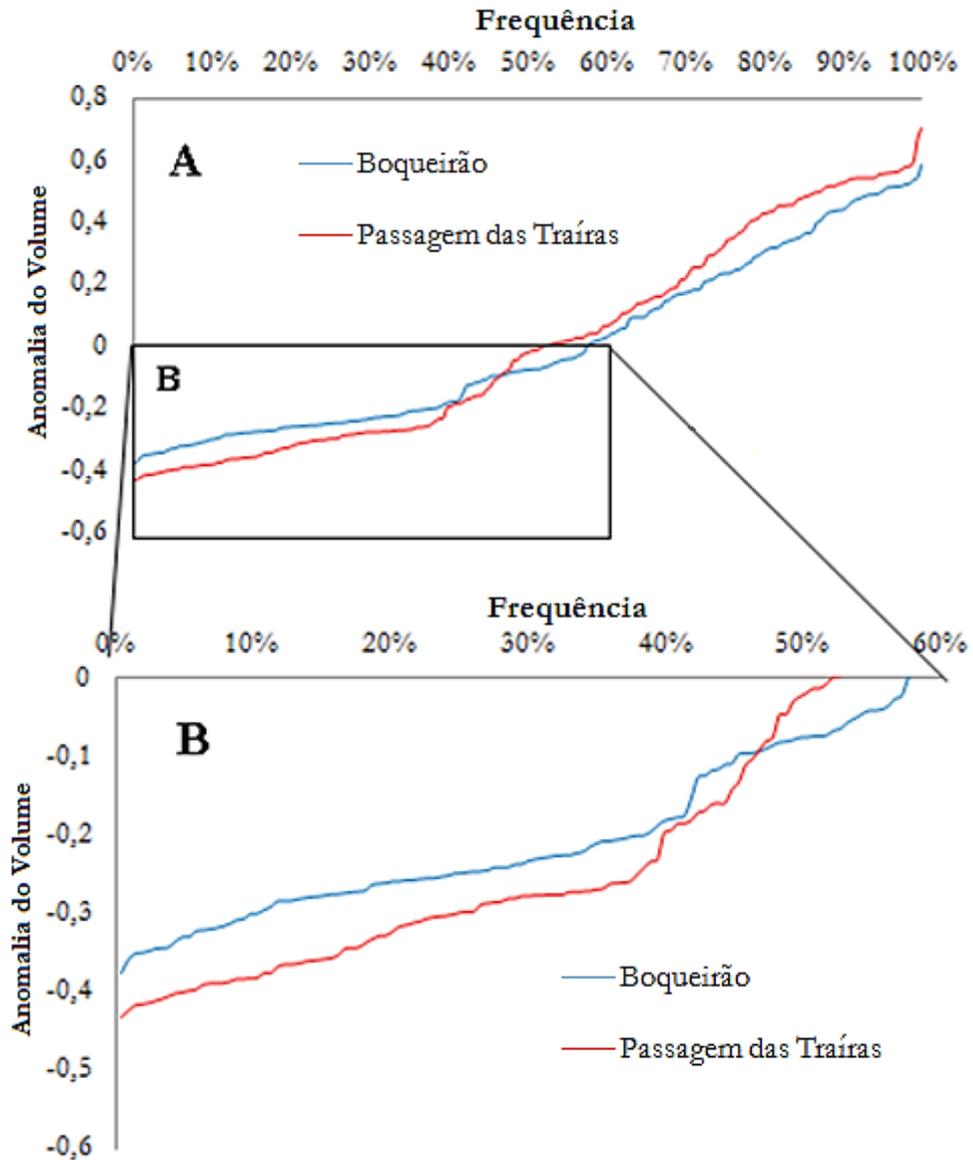
A frequência dos eventos de seca de acordo com a intensidade apresentou diferença para ambos os reservatórios. De maneira geral, a ocorrência das secas meteorológicas classificadas como leves são mais intensas no reservatório Passagem das Traíras, ao passo que, a ocorrência de secas meteorológicas classificadas como moderadas a extremas são mais intensas no reservatório Boqueirão. Em média, no reservatório Boqueirão, 55,9% das secas meteorológicas foram leves, 22,5% secas moderadas e 10,8% secas severas e extremas. Já para o Reservatório de Passagem das Traíras, 64,1% dos eventos foram secas meteorológicas de leve intensidade; 15,4% secas moderadas; 11% e 9,4% como secas severas e extremas, respectivamente (Figura 5).



**Figura 5.** Curva de Intensidade da seca (SPI) em função da frequência para os reservatórios Boqueirão e Passagem das traíras.

A frequência da anomalia relativa do volume dos reservatórios (eventos de seca hidrológica) de acordo com intensidade apresentou no reservatório Boqueirão uma seca hidrológica em 57% do tempo (Figura 6), enquanto que Passagem das Traíras apresentou uma seca hidrológica em 52,2% dos meses estudados (Figura 6). Por outro lado, no reservatório de Passagem das Traíras as secas hidrológicas

de menor ocorrência, abaixo de 45% do total de eventos, foram mais intensas do que as secas hidrológicas ocorridas no reservatório Boqueirão (Figura 6).



**Figura 6.** Curva da anomalia do volume relativo em função da frequência para os reservatórios do Boqueirão e Passagem das traíras, dando ênfase ao período correspondente aos eventos de seca nos reservatórios.

## 2.4. Discussão

As regiões estudadas estão situadas em locais que são afetados pelas secas recorrentes e que se tornaram mais frequentes, e com maior intensidade na região semiárida (IPCC, 2014). As secas existentes nos reservatórios estudados apresentaram intensidades e duração distintas ao longo dos anos, e a última seca registrada (2012-2019), para ambos os reservatórios, foi a mais intensa e longa, com duração de oito anos.

A classificação das secas é complexa (WILHITE, 2000), mas é fundamental para situar-se diante de eventos semelhantes e, se for o caso, auxiliar na tomada de decisões para minorar seus impactos. O SPI utilizado neste trabalho auxiliou na classificação das secas meteorológicas e proporcionou classificá-las, definindo o seu início e fim, bem como, quantificando as suas intensidades. Ao correlacionar o SPI com a anomalia do volume dos reservatórios, foi obtido que o SPI-36 é o que melhor responde as variações no volume dos reservatórios. Este resultado corrobora com os resultados encontrados por GANDU et al. (2015), que mostraram que a melhor correlação entre a precipitação e o volume relativo da água armazenada nos reservatórios do estado do Ceará foi encontrado com o SPI de 36 meses.

Cabe destacar que, para o reservatório de Boqueirão, durante o período de Mar/2001 a Jul/2019, este reservatório apresentou quatro períodos de seca meteorológica, ocorridos em: 2001-2002 (Mar/2001 a Jan/2002); 2003 (Abr/2003 a Dez/2003); 2007-2008 (Set/2007 a Fev/2008); e, por fim, 2012-2019 (Ago/2012 a Jul/2019). Estes períodos de seca foram distintos entre si, variando em intensidade e duração. O período que mais se destacou foi a seca de 2012-2019 classificada como a maior seca durante o período estudado, tanto em duração, quanto em intensidade, que chegou a apresentar diversos meses com classificação de seca Extrema.

O reservatório de Passagem das Traíras também passou por quatro períodos de seca meteorológica: 2001-2002 (Mar/2001 a Jan/2002); 2003 (Jul/2003 a Dez/2003); 2007-2008 (Jan/2007 a Mar/2007 - Jul/2007 a Fev/2008); e 2012-2019 (Mai/2012 a Jul/2019). Em termos de duração, estes períodos de seca meteorológica são levemente distintos em relação ao reservatório de Boqueirão. As secas neste reservatório provocam maiores déficits no volume armazenado do que o reservatório de Boqueirão. Na seca de 2012-2019, o reservatório entrou em colapso

hídrico e permaneceu sem condições de oferecer, suficientemente, água para os devidos usos na região.

Quanto à frequência das secas meteorológicas, de maneira geral, as “secas leves” são mais intensas no reservatório de Passagem de Traíras, ao passo que as “secas moderadas” e as “secas extremas” são mais intensas no reservatório do Boqueirão. Em média, essas secas corresponderam de 22,5 a 10,8% do total dos eventos no reservatório do Boqueirão, enquanto que no reservatório de Passagem das Traíras, esses eventos corresponderam a 15,5 a 9,4% do total dos eventos. Por outro lado, a ocorrência das secas hídricas mais intensas, aquelas inferiores a 45% do total de eventos, apresentaram um maior déficit na anomalia do volume armazenado relativo no reservatório de Passagem de Traíras.

De maneira geral, a quantidade de secas meteorológicas que ocorreram entre mai/2001 a dez/2019 foram quatro. A seca mais crítica “seca severa”, durou mais de 80 meses, tendo início em mai/2012 (ago/2012), para o reservatórios de Passagem de Traíras (Boqueirão), até final do período estudado (jul/2019). As consequências deste último evento de seca, tido como um dos mais severos da história no nordeste brasileiro (CUNHA et al., 2019), reduz a atividade pesqueira nos reservatórios, diminui a oferta hídrica e degrada a qualidade da água. Essa seca afeta diretamente a sociedade que dependem dos reservatórios, principalmente, os mais pobres, que dependem essencialmente da água disponível dos reservatórios, e não conseguem recorrer a outras fontes.

## **2.5. Conclusões**

Diante da avaliação empregada foi observada uma considerável correlação do início e duração entre a seca meteorológica, constatada com déficit de precipitação reportado com o SPI de 36 meses, e a seca hídrica, observada pelo déficit no volume dos reservatórios. Percebe-se que a utilização do SPI para auxiliar na classificação das secas, assim como outros estudos, é uma ferramenta útil e pode ser utilizada para identificar a ocorrência da seca hídrica nos reservatórios. Com o auxílio do SPI e a consequente classificação das secas meteorológicas, foi possível avaliar a variabilidade temporal do volume armazenado nos reservatórios associada às secas na região semiárida. Com auxílio desse índice e com o volume

armazenado observou-se que a seca de 2012-2019 afetou distintamente os reservatórios de Boqueirão e Passagem das Traíras.

Salienta-se que a atribuição do SPI 36, neste trabalho, é em função da estatística aqui empregada, e qualquer localidade deve melhor adequar o SPI para a realidade local existente, não sendo o SPI 36 a regra de uso para associação com a seca hidrológica, devendo ser estudada, caso a caso, considerando a hidrologia e a climatologia da região, e uso de variáveis morfométricas, como o tamanho e a profundidade do reservatório, quando um número maior de reservatórios forem utilizados na investigação.

Ainda, é sugestivo estudar se outros índices de seca meteorológica poderiam melhor se correlacionar com o volume do reservatório ou semelhante, e também para investigar a possibilidade da utilização de análises estatísticas paramétricas, bem como classificar as secas hidrológicas dos reservatórios, uma vez que a classificação das secas é complexa e demanda maior aprofundamento.

## 2.6. Referências

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; DE MORAES, G.; LEONARDO, J.; SPAROVEK, G.. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. <https://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>

ANA – Agência Nacional de Águas. Plano de Recursos Hídricos Piancó-Piranhas-Açu. Resumo Executivo. Brasília: 2016.

BRITO, S.S.B.; CUNHA, A.P.M.A.; CUNNINGHAM, C.C.; ALVALÁ, R.C.; MARENGO, J.A.; CARVALHO, M.A.. Frequency, duration and severity of drought in the Semiarid Northeast Brazil region. *Int. J. Climatol.* V. 38, p. 517-629, 2017. <https://doi.org/10.1002/joc.5225>

CAMPOS, J. N. B.; STUDART, T. M. C. Drought and water policies in Northeast Brazil: backgrounds and rationale. *Water policy*, v.10, p.425-38, 2008.

CUNHA, A.P.M.A.; ZERI, M.; LEAL, K.D.; COSTA, L.; CUARTAS, L.A.; MARENGO, J.A.; TOMASELLA, J.; VIEIRA, R.M.; BARBOSA, A.A.; CUNNINGHAM, C.C.; GARCIA, J.V.C.; BROEDEL, E.; ALVALÁ, R.C.; RIBEIRO NETO, G.. Extreme Drought Events over Brazil from 2011 to 2019. *Atmosphere*, v.10, n.11, p. 1-20, 2019.

FRANCHINI, M.; MANNUCCI, P.M.. 2015. Impact on human health of climate changes. *Eur. J. Int. Med.* v. 26, n. 1, p.1–5, 2015.

FRANCHITO, S.H.; FERNANDEZ, J.P.R.; PAREJA, D.. Surrogate climate change scenario and projections with a regional climate model: impact on the aridity in South America. *Am J Clim Chang*, v.3, n.5, p. 474–489, 2014.

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

GANDU, A. W.; SILVA, R. F. V.; MARTINS, E. Drought Identification In Ceará State Using The Standardized Precipitation Index (SPI). VI-International Climatology Symposium, 2015.

HAYES, M.J.; WILHITE, D.A.; VANYARKHO, O. V.. Monitoring the 1996 Drought Using the Standardized Precipitation Index. Bull. Am. Meteorol. Soc. v. 80, n.3, p. 429–438, 1996. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1999\)080%3C0429:MTDUTS%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1999)080%3C0429:MTDUTS%3E2.0.CO;2)

JOETZJER, E.; DOUVILLE, H.; DELIRE, C.; CIAIS, P.; DECHARME, B.; TYTECA, S.. Hydrologic benchmarking of meteorological drought indices at interannual to climate change timescales: a case study over the Amazon and Mississippi river basins. Hydrol Earth Syst Sci, v.17, p. 4885–4895, 2013. <https://dx.doi.org/10.5194/hess-17-4885-2013>.

KUMAR, M.N.; MURTHY, C.S.; SETHA SAI M.V.R.; ROY, P.S.. On the use of Standardized Precipitation Index (SPI) for drought intensity assessment. Meteorol. Appl. 101,v.16, n. 3, p. 381–389, 2009.<https://dx.doi.org/10.1002/met.136>

LI, B.; RODELL, M.. Evaluation of a model-based groundwater drought indicator in the conterminous U.S. J Hydrol, v.526, p. 78–88, 2014. <https://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.09.027>.

MARENGO J.A.; BERNASCONI, M.. Regional differences in aridity/drought conditions over Northeast Brazil: present state and future projections. Clim Chang, v.129, n.1 e 2, p. 103-115, 2015. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1310-1>.

MARENGO, J.A.; TORRES, R.R.; ALVES, L.M.. Drought in Northeast Brazil – past, present, and future. Theor. Appl. Climatol. v. 129, n. 3-4 p. 1189–1200, 2016. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1840-8>

MARENGO, J.A.; ALVES, L.M.; ALVALÁ, R.C.; CUNHA, A.P.; BRITO, S.; MORAES, O.L.. Climatic characteristics of the 2010–2016 drought in the semiarid Northeast Brazil region. An. Acad. Bras. Cienc. V. 90, n. 2, p. 1973–1985, 2017. <http://dx.doi.org/10.1590/0001-3765201720170206>

MARTINS, E.S.P.R., DE NYS, E., MOLEJÓN, C., BIAZETO, B., SILVA, R.F. V., ENGLE, N., 2015. Série Água Brasil: Monitor de Secas do Nordeste, em busca de um novo paradigma para a gestão de secas, Série Água Brasil, v.10, Ed. 1, 2015. <https://dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.4238.8886>

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

NALBANTIS, I.; TSAKIRIS, G.. Assessment of hydrological drought revisited. Water Resour Manag, v.23, p. 881–897, 2009. <https://dx.doi.org/10.1007/s11269-008-9305-1>.

PALMER W.C.. Meteorological Drought. Weather Bureau. Research Paper, U.S. Department of Commerce Weather Bureau, Washington, DC, n. 45 p.58, 1965 .

GUMMUS, V.; ALGIN, H. M.. Meteorological and hydrological drought analysis of the Seyhan–Ceyhan River Basins, Turkey. *Meteorol Appl* v.24, n. 1 p. 62–73. 2016. <https://doi.org/10.1002/met.1605>

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Summary for policymakers. In: FIELD, C. B.; BARROS, V. R.; DOKKEN, D. J.; MACH, K. J.; MASTRANDREA, M. D.; BILIR, T. E.; CHATTERJEE, M.; EBI, K. L.; ESTRADA, Y. O.; GENOVA, R. C.; GIRMA, B.; KISSEL, E. S.; LEVY, A. N.; MACCRACKEN, S.; MASTRANDREA, P. R.; WHITE, L. L. (Eds.). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press. p. 1-32, 2014.

SALVADOR, C.; NIETO, R.; LINARES, C.; DIAZ, J.; GIMENO, L.. Effects of droughts on health: Diagnosis, repercussion, and adaptation in vulnerable regions under climate change. Challenges for future research. *Science of The Total Environment*. v. 703, p. 1-8, 2019.

SEMARH - Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos do Rio Grande do Norte. Available from: <<http://www.semarh.rn.gov.br/>>. Acess on 05 Feb. 2019.

VAN LOON, A. F.. Hydrological drought explained. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, v.2, n.4, p. 359–392, 2015. <https://dx.doi/10.1002/wat2.1085>

VIAU, A.A.; VOGT, J. V... Scale Issues in Drought Monitoring. In: Vogt J.V., Somma F. (eds) *Drought and Drought Mitigation in Europe. Advances in Natural and Technological Hazards Research*. Springer, Dordrecht. Springer, Dordrecht, vol 14, n 1, p. 185-193, 2000. [https://dx.doi/10.1007/978-94-015-9472-1\\_14](https://dx.doi/10.1007/978-94-015-9472-1_14)

WILHITE, D.A.. Drought as a natural hazard: concepts and definitions. In: Wilhite, D.A. (Ed.), *Drought: A Global Assessment*. Routledge, New York, v. 1, p. 3 – 18, 2000.

ZHAI, J.; BUDA, S.; KRYSANOVA, V.; VETTER, T.; GAO, C.; JIANG, T.. Spatial Variation and Trends in PDSI and SPI Indices and Their Relation to Streamflow in 10 Large Regions of China. *J Clim*, v.23, p. 649–663, 2010. . <https://dx.doi/10.1175/2009JCLI2968.1>.

### 3. CAPÍTULO 2 – MUDANÇA DO ESTADO TRÓFICO DURANTE UM EVENTO DE SECA PROLONGADA EM RESERVATÓRIOS DA REGIÃO SEMIÁRIDA, BRASIL.

*Trabalho a ser submetido na Revista Brasileira de Recursos Hídricos*

#### RESUMO

A eutrofização é um problema global e uma importante causa de degradação da saúde ecológica de corpos hídricos. Os fatores climáticos podem resultar em variação nos aspectos físicos, químicos e biológicos dos corpos hídricos. Modelos de mudanças climáticas globais estão prevendo a maior ocorrência de eventos extremos como mais frequência de eventos de seca para região semiárida, gerando impactos na qualidade de água dos corpos hídricos. O semiárido apresenta características peculiares, como a intermitência de rios, altas temperaturas e taxas de evaporação, que aliado à seca prolongada, tendem a aumentar os níveis de nutrientes e o tempo de residência da água de mananciais. Este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito do evento extremo de seca prolongada no estado trófico de mananciais da região semiárida, verificando se houve alteração dos mesmos. A hipótese do trabalho é que haja uma mudança de estado trófico dos mananciais devido aos eventos extremos de seca, aumentando a eutrofização devido ao aumento do aporte autóctone do sistema. Os reservatórios estudados foram Boqueirão de Parelhas e Passagem das Traíras, localizados na região semiárida tropical. O trabalho foi realizado com três períodos distintos, determinados de acordo com a classificação da seca com o auxílio do índice de precipitação padronizada (SPI). Os períodos foram marcados por precipitação abaixo da média histórica anual, estando assim inseridos em um período de estiagem prolongada. Foram analisadas as variáveis transparência da água, turbidez, sólidos suspensos totais, condutividade elétrica, pH, fósforo total, fósforo reativo dissolvido, nitrato, amônia e clorofila-a. Os resultados indicaram que houve um aumento da clorofila-a, condutividade elétrica, pH e turbidez em função da redução do volume hídrico dos reservatórios. Como também, quando comparado os períodos, foram verificadas, variação nas concentrações de fósforo total e fósforo reativo dissolvido. Nesse sentido, o estudo demonstrou que o prolongamento da seca impactou na intensificação da eutrofização alterando o estado de trofia, de mesotrófico para eutrófico, para o reservatório Boqueirão de Parelhas, Para Passagem das Traíras foi avaliado a permanência do estado eutrófico, mas com impactos mais intensificados, como aumento da biomassa algal confirmado nossa hipótese de trabalho.

**Palavras-chave:** qualidade da água; evento de seca prolongada; eutrofização; mananciais de abastecimento; evento extremo; índice de precipitação padronizada.

## ABSTRACT

Eutrophication is a global problem and an important cause of degradation of the ecological health of water bodies. Climatic factors can result in variation in the physical, chemical and biological aspects of water bodies. Models of global climate change are predicting the highest occurrence of extreme events as more frequency of drought events for the semiarid region, generating impacts on the water quality of the water bodies. The semiarid region has peculiar characteristics, such as the intermittency of rivers, high temperatures and evaporation rates, which, combined with prolonged drought, tend to increase the levels of nutrients and the residence time of water sources. This work aimed to evaluate the effect of the extreme event of prolonged drought on the trophic state of springs in the semiarid region, checking if there was any change in them. The hypothesis of the work is that there is a change in the trophic state of the springs due to extreme drought events, increasing eutrophication due to the increase of the autochthonous contribution of the system. The reservoirs studied were Boqueirão de Parelhas and Passagem das Traíras, located in the tropical semi-arid region. The work was carried out with three distinct periods, determined according to the classification of the drought with the aid of the standardized precipitation index (SPI). The periods were marked by precipitation below the annual historical average, thus being inserted in a period of prolonged drought. The variables water transparency, turbidity, total suspended solids, electrical conductivity, pH, total phosphorus, dissolved reactive phosphorus, nitrate, ammonia and chlorophyll were analyzed. The results indicated that there was an increase in chlorophyll-a, electrical conductivity, pH and turbidity due to the reduction in the water volume of the reservoirs. As well, when comparing the periods, variations in the concentrations of total phosphorus and dissolved reactive phosphorus were verified. In this sense, the study demonstrated that the prolongation of the drought had an impact on the intensification of eutrophication, changing the state of trophy, from mesotrophic to eutrophic, for the Boqueirão de Parelhas reservoir, For Passagem das Traíras the permanence of the eutrophic state was evaluated, but with more impact intensified, as an increase in algal biomass confirmed our working hypothesis.

**Keywords:** water quality; prolonged drought event; eutrophication; supply springs; extreme event; standardized precipitation index.

### 3.1. Introdução

A eutrofização é um processo de enriquecimento de nutrientes (nitrogênio e fósforo) resultando em um aumento da produtividade primária, ocasionando a perda do equilíbrio ecológico e a degradação progressiva do ecossistema aquático (SCHINDLER, 2006). Como consequência desse processo se verifica um aumento de biomassa algal e turbidez, redução da transparência, mudanças na cor e odor da água e diminuição da concentração de oxigênio dissolvido (DODDS et al., 2009).

A eutrofização artificial, resultado de atividades antropogênicas, foi descrita há quatro décadas e atualmente ainda representa um fenômeno em expansão (SMITH; SCHINDLER, 2009). Este processo é, portanto, resultado da má gestão dos recursos hídricos, na qual deve atender a demanda crescente exigida pelo aumento global da população humana e, ainda, suportar as descargas de efluentes doméstico, industrial e da agropecuária (TUNDIS; MATSUMURA-TUNDISI, 1992).

Fatores hidrológicos e climáticos afetam diretamente a qualidade da água dos reservatórios (NASELLI- FLORES; BARONE, 2005; SOARES et al., 2012, JEPPESEN et al., 2015). Estas mudanças nos níveis de água de reservatórios estão associadas a mudanças nas características físicas, químicas e biológicas desses sistemas e podem resultar na alteração do estado trófico (NASELLI-FLORES; BARONE, 2003; ROCHA JÚNIOR et al., 2018). De modo que, estas mudanças na precipitação e evaporação como consequências das mudanças climáticas irão agravar os sintomas da eutrofização (MOSS, 2011), especialmente em eventos extremos de seca prolongada ou chuvas intensas. Os efeitos da variabilidade de precipitação na qualidade de água pode ser uma combinação de ambos mecanismos: concentração de nutrientes em períodos de seca, devido principalmente à redução de volume hídrico; e aumento de material alóctone durante o período de chuvas intensas esporádicas (NOBRE et al., 2020).

De acordo com os modelos globais de mudanças climáticas, eventos extremos poderão ser mais comuns do que se tem registrado (IPCC, 2014), o que aumentará a frequência de períodos de estresse hidrológico em regiões áridas e semiáridas, devido ao aquecimento climático (JEPPESEN et al., 2009; MARENGO; TORRES; ALVES, 2016). As secas são condicionadas pela ocorrência do El Niño, mas a observação de uma variabilidade climática mais extrema nas últimas cinco

décadas revela que sua incidência e consequências estão ligadas à ação humana (VIANA, 2013).

A superposição de secas as questões sócio-econômico-político preexistentes coloca uma grande pressão sobre a disponibilidade e a qualidade da água doce na região e ameaça fortemente a sua segurança hídrica, energética e alimentar (GUTIÉRREZ et al. 2014). Prevê-se que as secas, em particular, aumentarão em frequência e intensidade no Nordeste do Brasil sob as mudanças climáticas (WORLD BANK, 2013). A seca que se intensificou em 2012 e se estendeu até 2019 é considerada a mais severa nas últimas décadas, e gerou impactos em muitos distritos nas regiões semiáridas dos estados do nordeste brasileiro, afetando quase 9 milhões de pessoas (MARENGO et al. 2013; CUNHA et al., 2019). Estudos apontam que a região semiárida já têm apresentado sintomas de intensificação da eutrofização decorrente destes eventos extremos de seca (COSTA et al., 2016; FIGUEIREDO; BECKER, 2018; ROCHA JUNIOR et al., 2018; COSTA et al., 2019).

Diante do exposto, o objetivo deste estudo foi avaliar os impactos da seca prolongada na qualidade da água de mananciais da região semiárida, através da verificação da intensificação do estado trófico dos mesmos. A hipótese do trabalho é que haja uma intensificação do estado trófico dos mananciais devido aos eventos extremos de seca, aumentando do aporte autóctone do sistema.

## **3.2. Materiais e Métodos**

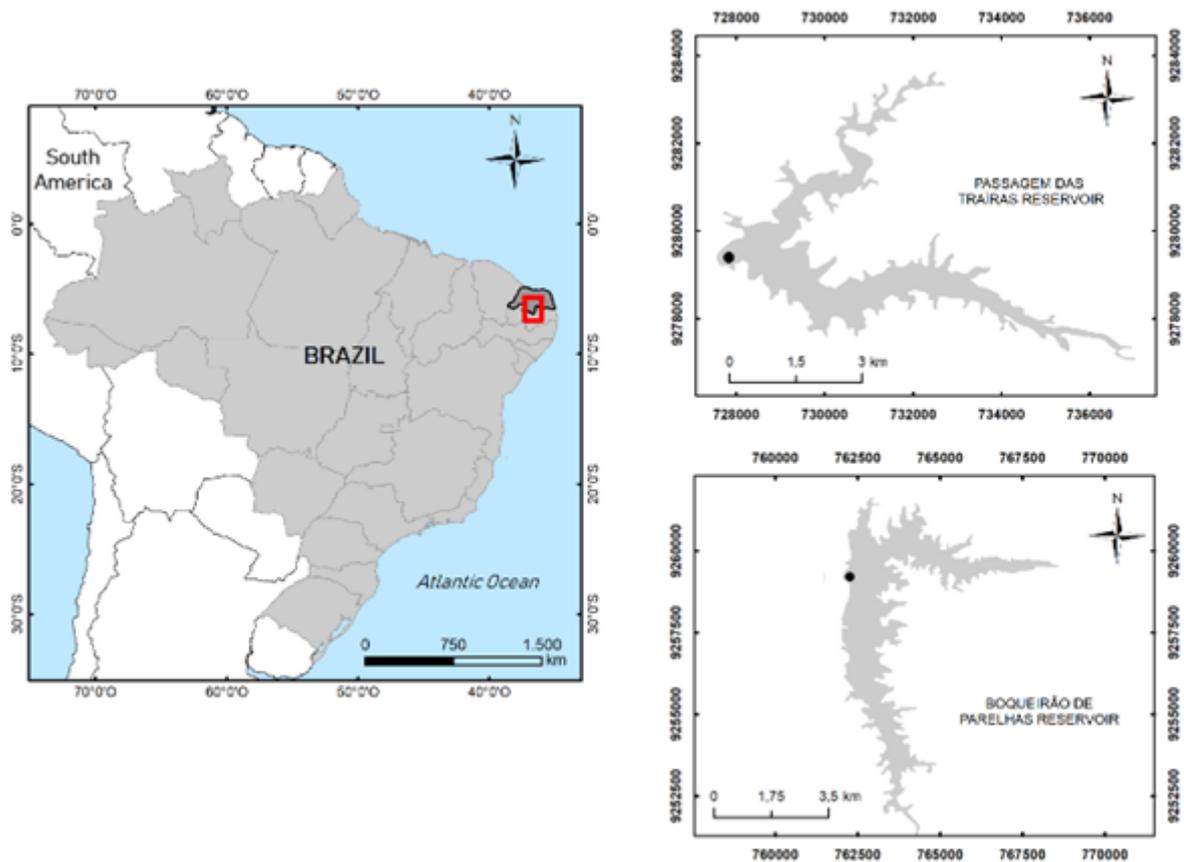
### *3.2.1. Área de Estudo*

Os mananciais que foram estudados estão localizados na região do semiárido do Rio Grande do Norte na bacia hidrográfica do Rio Piranhas-Açu (Figura 7): Boqueirão de Parelhas (6°41'15"S; 36°41'15"W) localizado no município de Parelhas, e Passagem das Traíras (6°27'16"S; 36°52'29"W) em São José do Seridó.

O reservatório de Boqueirão de Parelhas foi construído no ano de 1988, pelo barramento do Rio Seridó. O manancial possui uma capacidade máxima de acumulação de 84.792.119,23 m<sup>3</sup>, compreendendo uma área de 1267,27 ha, com uma profundidade máxima de projeto de 29 metros (SEMARH, 2019). O reservatório de Passagem das Traíras é um reservatório construído no ano de 1994, do Rio Seridó. Este reservatório possui uma capacidade máxima de acumulação

49.702.393,65 m<sup>3</sup>, abrangendo uma área de 1042,90 ha, e uma profundidade máxima de 25,5 metros (SEMARH, 2019).

A região onde estão inseridos os reservatórios é de clima tropical semiárido BS'h' (tipo estepe) (ALVARES et al., 2013), cuja precipitação atinge valores médios em torno de 440 mm ao ano, com chuvas concentradas de fevereiro a maio (ANA, 2016). Os reservatórios são majoritariamente utilizados para fins de abastecimento público, dessedentação de animais, irrigação e recreação.



**Figura 7.** Localização Geográfica dos reservatórios Boqueirão de Parelhas e Passagem das Traíras na região semiárida do nordeste brasileiro, indicando o ponto amostral de ambos,

### 3.2.2. Amostragem

As amostras de água foram coletadas mensalmente no ponto de amostragem próximo à barragem (Figura 7), onde ocorre a captação de água para abastecimento humano e é o ponto mais profundo do reservatório.

As amostras de água foram integradas no epilímnio utilizando a garrafa de Van Dorn vertical. O epilímnio foi determinado a partir dos perfis verticais de oxigênio

dissolvido ou temperatura EXPLICAR. Os perfis de temperatura e oxigênio dissolvido foram medidos através de sonda multiparamétrica (HIDROLAB DS5) no período de 2012 e 2014, e através de Oxímetro portátil (INSTRUTHERM MO-900) nos anos 2018 e 2019. A transparência da água foi medida com auxílio do disco de Secchi,

As amostras para análise de amônia foram armazenadas em frasco âmbar e as demais amostras em garrafas de polietileno, ambas previamente lavadas com ácido clorídrico (HCL) a 10% e água deionizada, sendo, ainda, acondicionados em caixas térmicas com gelo durante o transporte até a realização das análises.

### 3.2.3. *Análises de Amostras*

Em laboratório, a turbidez (TURB) foi medida com o auxílio de um turbidímetro (PoliControl AP2000) e a condutividade elétrica (CE) medida com auxílio de condutivímetro (Tec-4MP). O fósforo total (PT) foi analisado pelo método do ácido ascórbico após oxidação com persulfato de potássio (VALDERRAMA, 1981). O íon amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) foi determinado pelo método colorimétrico através da nesslerização (APHA, 2005). As concentrações de nitrogênio inorgânico dissolvido (NID) foram determinadas a partir da soma das concentrações dos íons  $\text{NH}_4^+$  e  $\text{NO}_3^-$ .

A amostra coletada (água bruta) foi filtrada em filtros de fibra de vidro ( $\varnothing = 47$  mm; porosidade de  $1,2 \mu\text{m}$ ), realizando, posteriormente, a análise de fósforo reativo solúvel analisado pelo método do ácido ascórbico (MURPHY; RILEY, 1962) e o nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) se baseou na reação com salicilato de sódio formando o composto p-nitrosalicilato (MULLER; WIEDEMANN, 1955) que foram medidos por meio de espectrofotometria. Os filtros foram utilizados para análise de SS e clorofila-a. Os sólidos suspensos totais (SST) foram determinados por gravimetria após secagem dos filtros durante a noite a  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  (APHA, 2012). A clorofila-a foi extraída com etanol a 95% e medida por espectrofotometria (JESPERSEN; CHRISTOFFERSEN, 1987).

### 3.2.4. *Análise de dados*

Os dados sobre a precipitação mensal foram fornecidos pela Empresa de Pesquisa Agropecuária do estado do Rio Grande do Norte (EMPARN). Com base

nessas informações e no Índice de Precipitação Padronizado (SPI) (MCKEE; DOESKEN; KLEIST, 1993), calculado com auxílio do Software R (pacote SPEI). O SPI é baseado na probabilidade de precipitação para diferentes escalas de tempo e pode ser utilizado para classificação da seca, onde as categorias de seca foram divididas em levemente seco, moderadamente seco, severamente seco e extremamente seco (Tabela 5).

**Tabela 5.** Categorias de Seca (SANTOS, et al. 2020; Capítulo 1)

SPI CLASSES	Classificação da Seca
$SPI \leq -2$	Extremamente Seco
$-2 < SPI \leq -1,5$	Severamente Seco
$-1,5 < SPI \leq -1$	Moderadamente Seco
$-1 < SPI \leq 0$	Levemente Seco

Sendo assim, os meses do nosso estudo foram subdivididos em períodos de acordo com uso do índice de precipitação normalizada (SPI, sigla em inglês), calculado com base na precipitação, proposto por McKee, T.B., N. J. Doesken (1993). Sendo o SPI referente à escala temporal de 36 meses o mais indicado (SPI36) (SANTOS et al., 2020; Capítulo 1):

Diante disso, os períodos foram denominados como: **Período I** (PI) o início da seca (janeiro 2012- dezembro 2012); **Período II** (PII) com cenário de seca Extrema/Severa (janeiro 2014- dezembro 2014) e o **Período III** (PIII) com seca Leve (junho de 2018- maio de 2019) .

A classificação mensal da seca, para Boqueirão e Passagem das Traíras seguiram as seguintes classificações como: seca leve, seca moderada, seca severa e seca extrema (SANTOS et al., 2020; Capítulo 1).

O volume armazenado nos reservatórios ao longo do período do estudo foram fornecidos pelo Instituto de Gestão das Águas do Rio Grande do Norte (IGARN).

A classificação de estado trófico abordada no trabalho será baseada nos valores de concentrações de fósforo total (TP) e clorofila-a (CHL-a) para categorizar o estado trófico do reservatório: Mesotrófico (TP < 50  $\mu\text{g.L}^{-1}$  e CHL-a < 15  $\mu\text{g.L}^{-1}$ ); Eutrófico (TP > 50  $\mu\text{g.L}^{-1}$  e CHL-a > 15  $\mu\text{g.L}^{-1}$ ), conforme Thornton, Rast (1993).

A fim de verificar gradientes temporais das unidades amostrais dos mananciais em relação à severidade da seca foi utilizada uma Análise de Componentes Principais (ACP) utilizando o PC program-ORD<sup>®</sup> v.6 (MCCUNE; MEFFORD, 2011) utilizando os dados de volume hídrico armazenado e as variáveis limnológicas: Secchi, pH, CE, OD, Turb, SST, PT, NID, FRS e Chl-a. Ainda, foi realizado análise de correlação de Pearson entre as 12 variáveis (volume hídrico, Secchi, pH, CE, OD, Turb, SST, PT, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, FRS e Chl-a), utilizado o software R (pacote Hmisc).

### 3.3. Resultados

#### 3.3.1. *Cenário Meteorológico e Hidrológico*

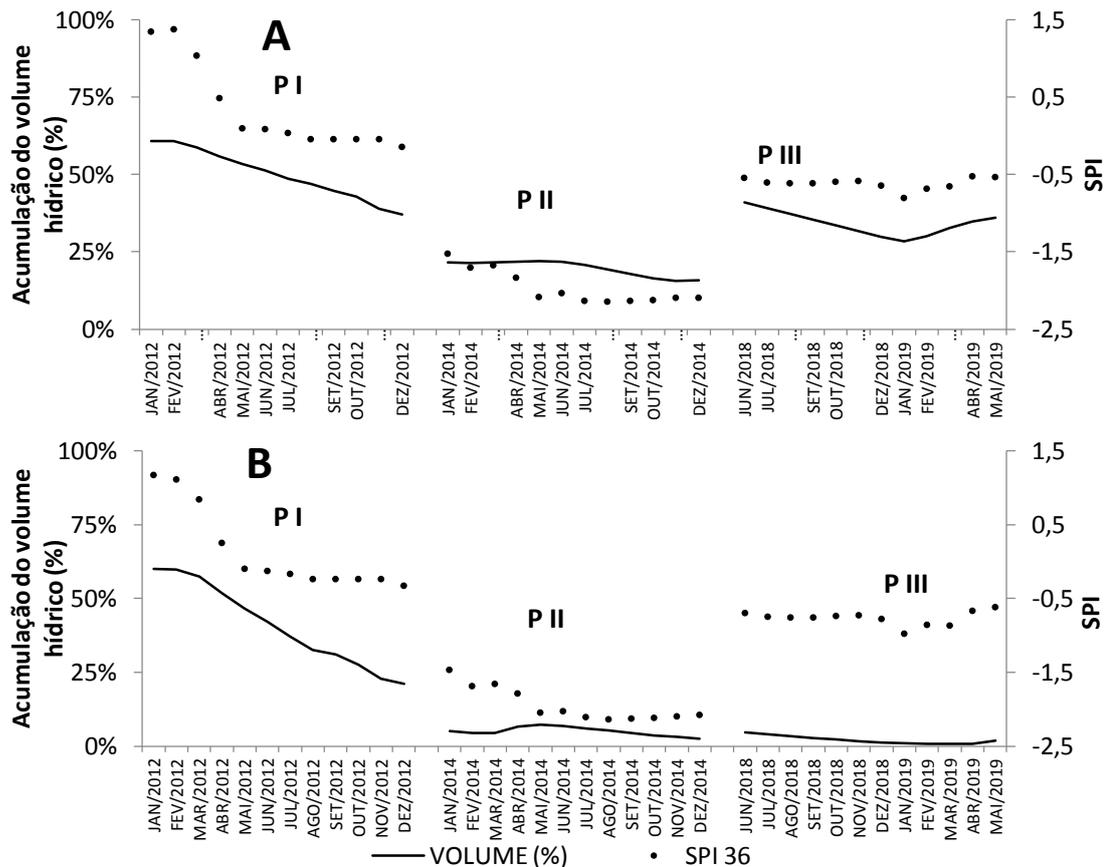
O **Período I** da região onde situa-se o reservatório de Boqueirão de Parelhas apresenta secas de intensidade leve, contudo nos 7 (sete) primeiros meses do ano não há seca; o **Período II** foi classificado em Severamente Seco a Extremamente Seco; e o **Período III** categorizado como levemente seco.

Para o reservatório de Passagem das Traíras o **Período I** foi majoritariamente categorizado como levemente seco, contudo nos 4 (quatro) primeiros meses do ano não há ocorrência de seca; Já durante o **Período II** a classificação da seca passa de moderadamente seco para Severamente seco chegando até a classificação de Extremamente Seco; e o **Período III** como Levemente Seco.

Os volumes armazenados nos reservatórios de Boqueirão de Parelhas e Passagem das Traíras variaram durante os períodos analisados (Figura 8).

A capacidade hídrica dos volumes dos reservatórios estava em torno de 60% de acumulação no início do estudo (2012). Ao longo do estudo a seca foi se intensificando, passando a ser categorizada como seca de severa a extrema nos reservatórios no ano de 2014 (Figura 8).

No último período do estudo (**Período III**) a seca passa a ser categorizada como leve para ambos mananciais, mas somente Boqueirão de Parelhas consegue recuperar, levemente, o volume hídrico acumulado, chegando a acumular no final do estudo cerca de 36% do seu volume (Figura 8).



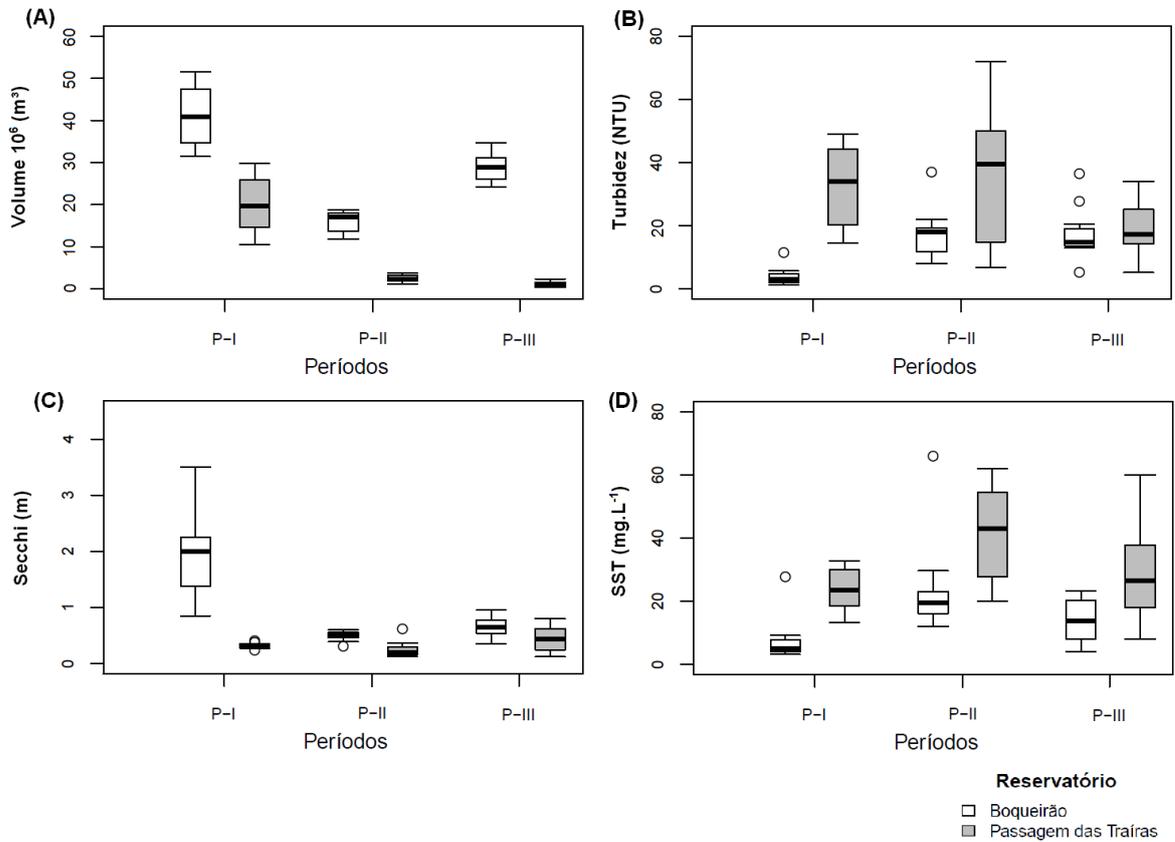
**Figura 8.** Acumulação do volume hídrico mensal (%) nos Períodos P I, P II e P III dos reservatórios. E o índice de precipitação padronizada para trinta e seis meses - SPI36. (A) Boqueirão de Parelhas; (B) Passagem das Traíras.

### 3.3.2. Cenário Limnológico

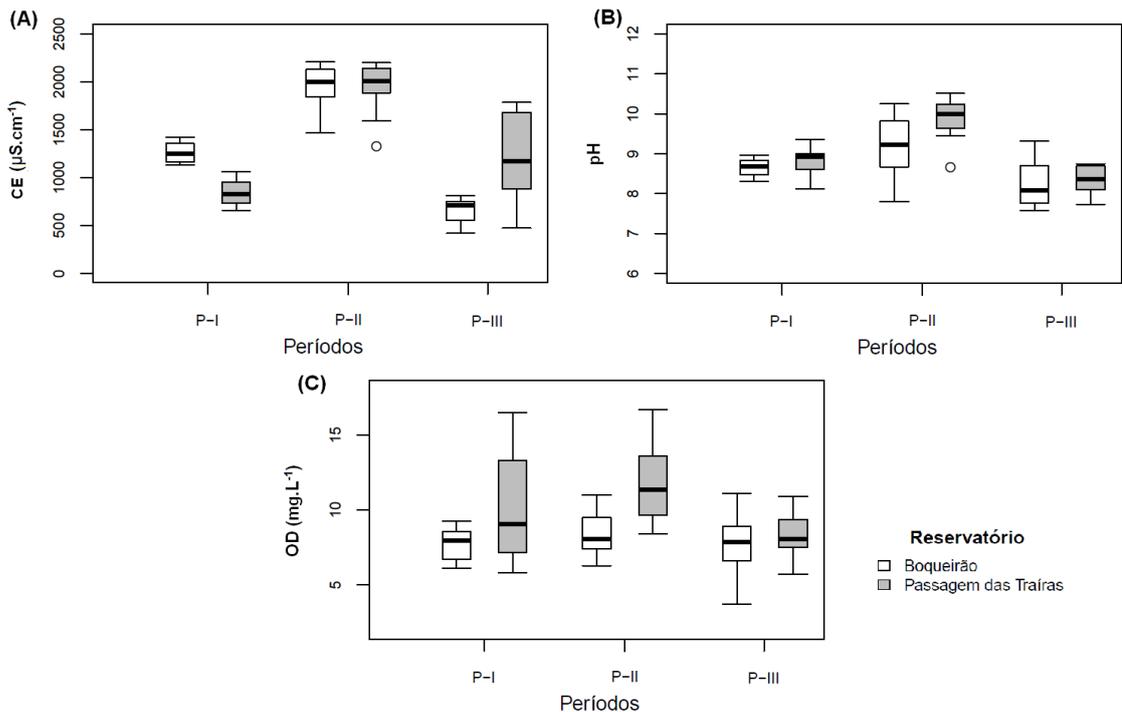
No Período I, em ambos os mananciais, o volume do reservatórios apresentaram as maiores medianas (Figura 9 - A). A TURB, SST, Condutividade Elétrica, pH, OD, apresentaram valores de mediana maiores no **Período II**, onde está instalado a seca severa/seca extrema para ambos os reservatórios (Figura 9 – B, D; Figura 10- A, B, C). A profundidade Secchi apresentou menor mediana no **Período II** tanto para Boqueirão quanto para Passagem das Traíras (Figura 9 - C).. O PT e o FRS apresentaram valores de mediana maiores no **Período III** para ambos os reservatórios (Figura 11 – B e D).

O  $\text{NO}_3^-$  apresentou em Boqueirão de Parelhas a maior mediana no **Período II**, entretanto, em Passagem das Traíras as maiores concentrações foram encontradas no **Período III** (Figura 11 - A). Os maiores valores de mediana de concentrações de Chl-a foram registrados no manancial Boqueirão de Parelhas no período III, enquanto que para Passagem das Traíras foram no **Período II** (Figura 11 - E). A

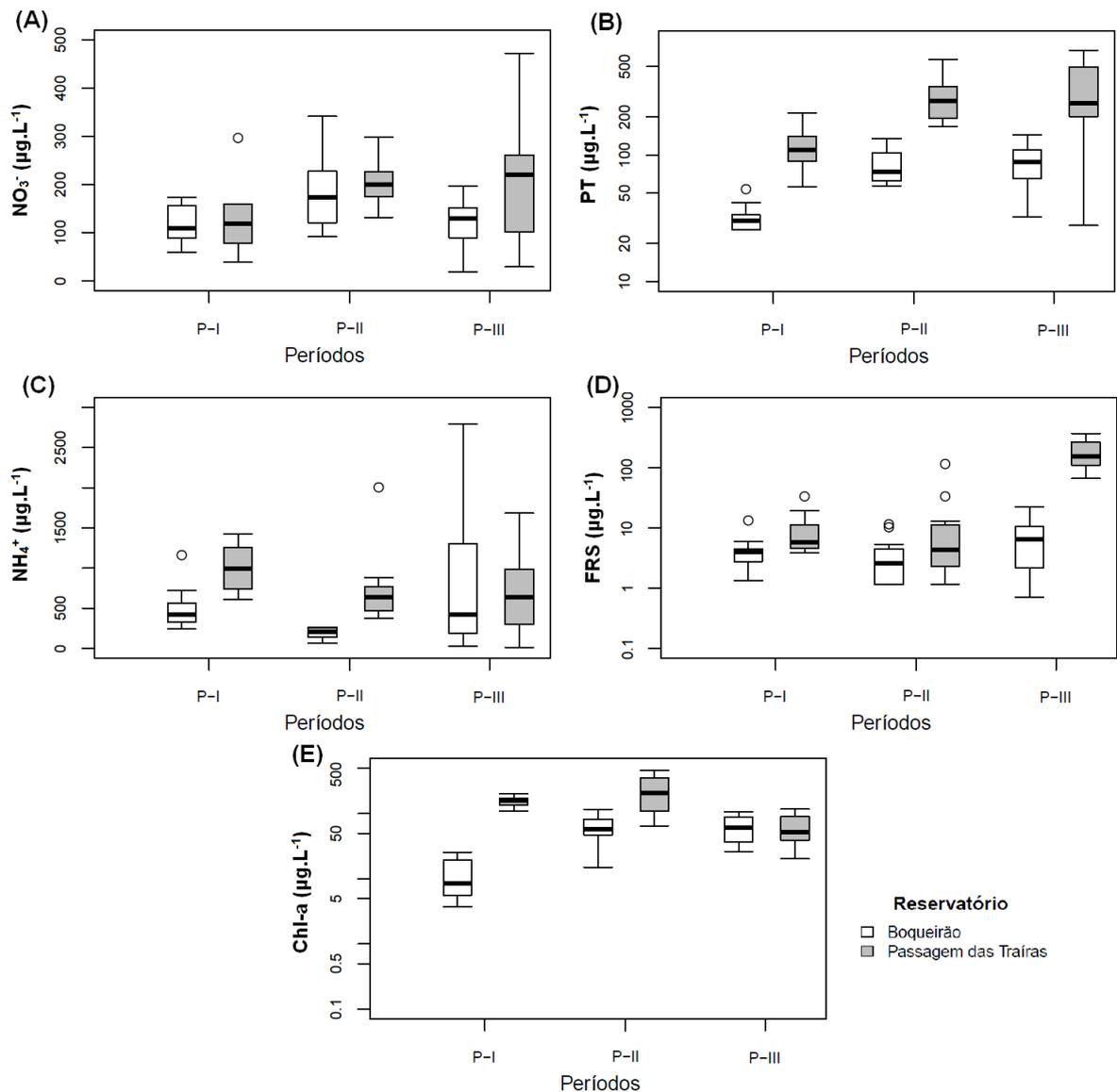
amônia ( $\text{NH}_4^+$ ) apresentou maior valor da mediana no reservatório de Boqueirão de Parelhas e Passagem das Traíras no **Período I**. (Figura 11- C).



**Figura 9.** Boxplot das variáveis físicas por período (P-I, P-II e P-III), referentes ao A) Volume Hídrico; B) Turbidez; C) Secchi; D) Sólidos Suspensos Totais (SST).



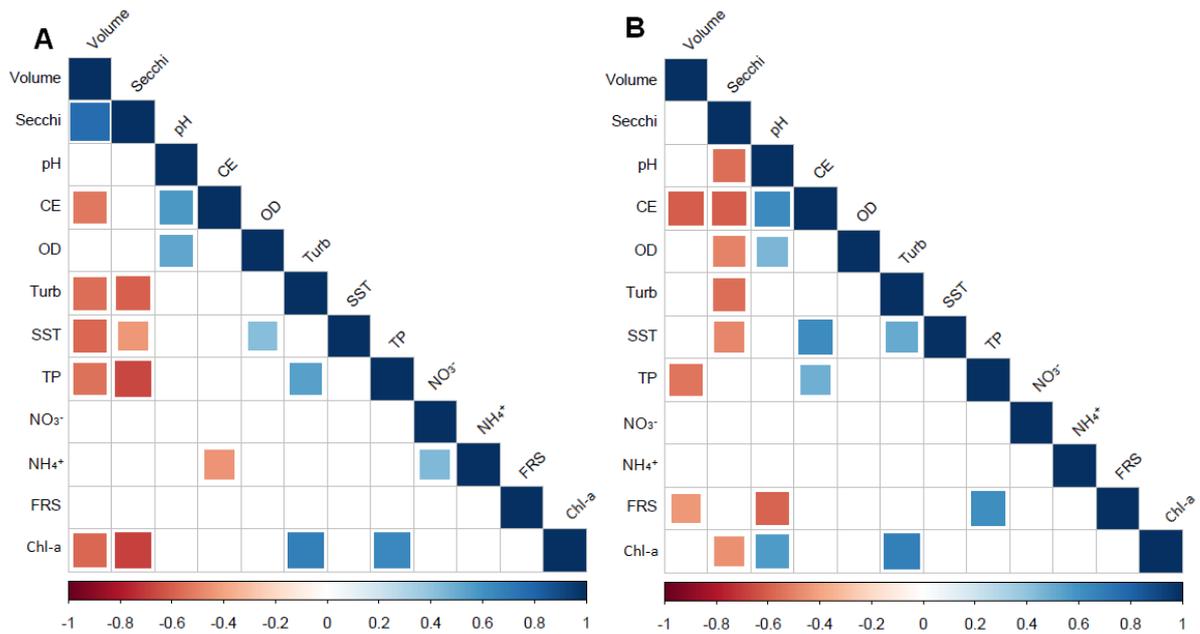
**Figura 10.** Boxplot das variáveis físico-químicas por período (P-I, P-II e P-III), referentes à A) Condutividade Elétrica (CE); B) pH; e C) oxigênio dissolvido (OD).



**Figura 11.** Boxplot dos nutrientes e biomassa algal por período (P- I, P-II e P-III), referentes a concentração de A) Nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ); B) Fósforo Total (PT); C) Amônia ( $\text{NH}_4^+$ ); D) Fósforo Reativo Solúvel (FRS), e E) Clorofila-a (Chl-a).

No reservatório de Boqueirão de Parelhas, foi observado que o volume hídrico correlacionou-se negativamente ( $p < 0,01$ ) com a condutividade elétrica, turbidez, sólidos suspensos totais, fósforo total e clorofila-a e positivamente ( $p < 0,01$ ) com a transparência Secchi (Figura 12).

O volume do reservatório de Passagem das Traíras apresentou uma correlação negativa ( $p < 0,01$ ) do volume hídrico com a condutividade elétrica, fósforo total e o fósforo reativo solúvel (Figura 12).



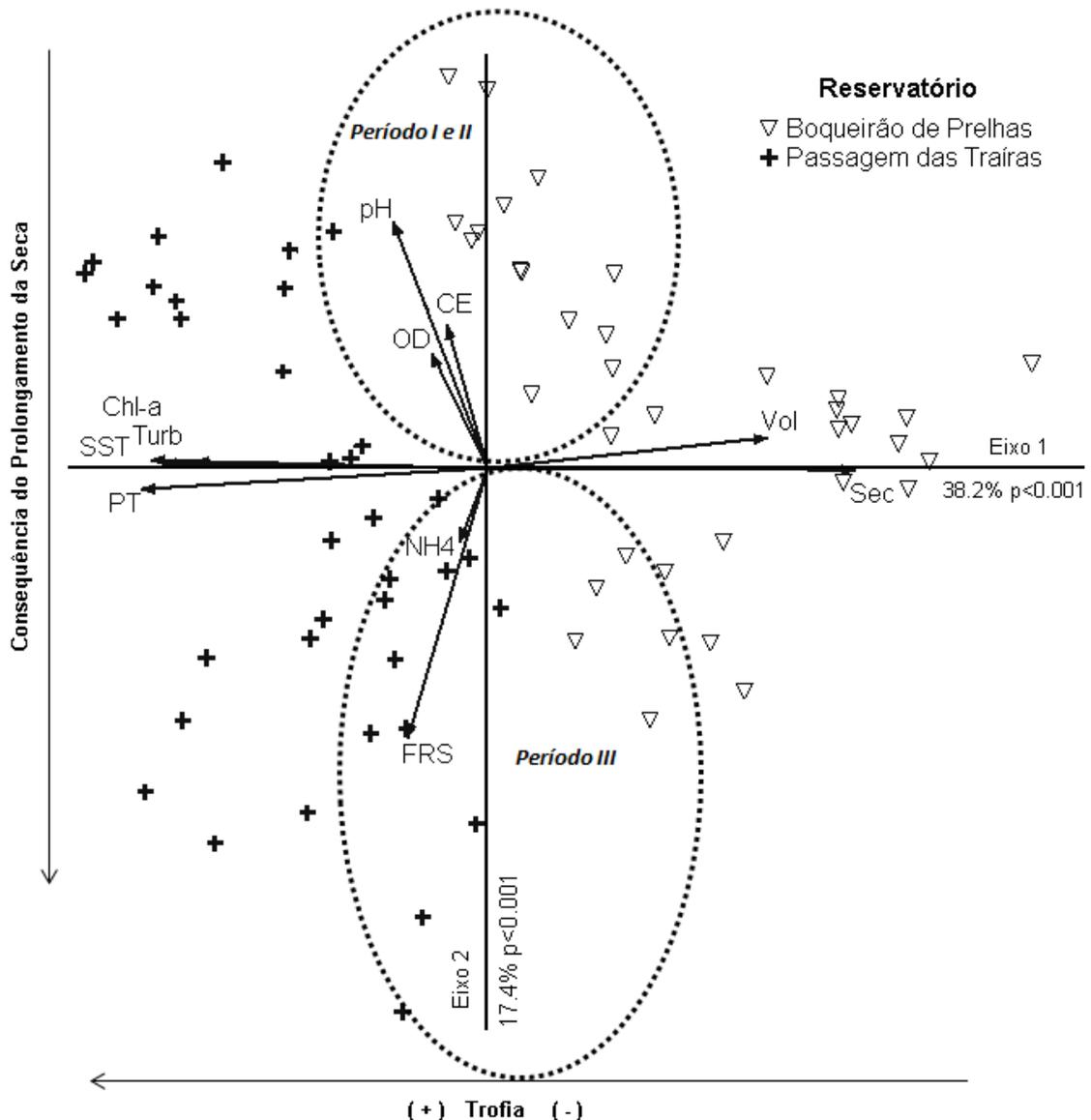
**Figura 12.** Apresentação da correlação de Pearson das 12 (doze) Variáveis com  $p < 0,01$ . (A) Boqueirão de Parelhas e (B) Passagem das Traíras.

condutividade elétrica (CE), profundidade de secchi (Secchi), oxigênio dissolvido (OD), turbidez (Turb), sólidos suspensos totais (SST), fósforo total (TP), nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), amônia ( $\text{NH}_4^+$ ), fósforo reativo solúvel (FRS) e clorofila (Chl-a).

A análise de componentes principais (ACP) mostrou as unidades amostrais segregadas por períodos amostrados, e não por reservatórios, explicando 55,6% dos dados (eixo 1: 38,2%, eixo 2: 17,4%), sendo o eixo 1 responsável por mostrar a tendência temporal de intensificação da eutrofização e o eixo 2 apresentando a tendência temporal dos efeitos do prolongamento da seca (Figura 13). Para o eixo 1 ( $P < 0,001$ ), as variáveis mais importantes na ordenação foram volume de água ( $r = 0,76$ ) e transparência Secchi ( $r = 0,89$ ) ordenadas no lado positivo; e turbidez ( $r = -0,79$ ), SST ( $r = -0,85$ ), TP ( $r = -0,86$ ) e clorofila-a ( $r = -0,82$ ) ordenados no lado negativo (Figura 13). Ainda no eixo 1 foi evidenciado que as unidades amostrais do Reservatório Boqueirão de Parelhas se localizavam no lado positivo do eixo, enquanto que Passagem das Traíras no lado negativo do eixo (Figura 13). Já para o eixo 2 ( $P < 0,001$ ), as variáveis mais importantes foram a condutividade elétrica ( $r = 0,51$ ), pH ( $r = 0,74$ ), OD ( $r = 0,49$ ) no lado positivo, e FRS ( $r = -0,75$ ) no lado negativo (Figura 13).

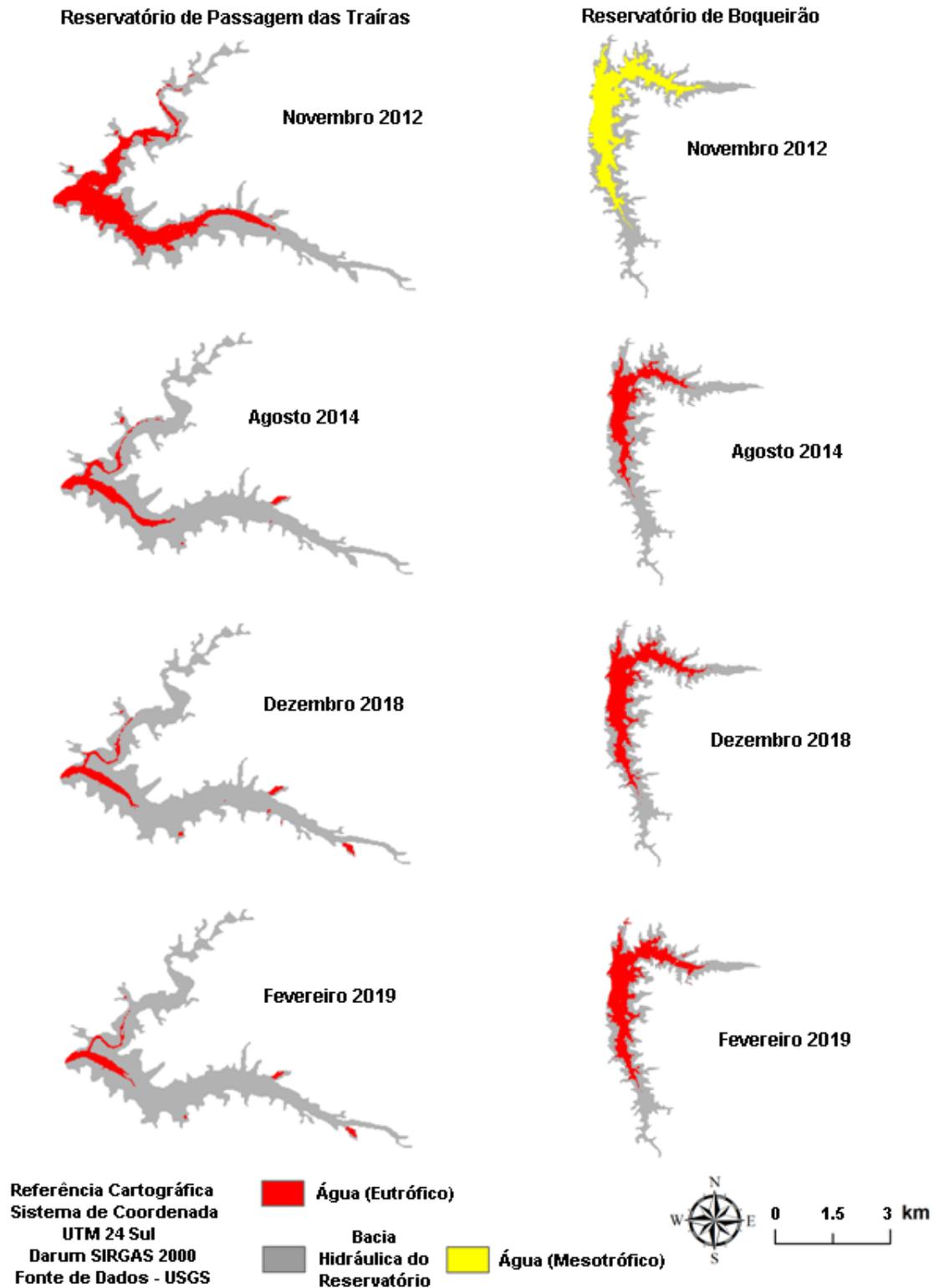
Com base concentrações de fósforo total (TP) e clorofila-a (Chl-a) para categorizar o estado trófico do reservatório, conforme Thornton and Rast (1993), foi observado que o reservatório de Passagem das Traíras manteve na pior

classificação trófica durante todo o estudo (Eutrófico). Já o reservatório de Boqueirão em Parelhas, inicialmente apresentava classificação trófica como sendo mesotrófico, entretanto, nos períodos posteriores (2014 e 2018/2019) o reservatório apresentou classificação como sendo Eutrófico (Figura 14).



**Figura 13.** Análise de componentes principais (ACP) do reservatório dos Reservatórios de Boqueirão de Parelhas e Passagem das Traíras. BOQ = Reservatório de Boqueirão, PAS = Reservatório de Passagem das Traíras.

volume hídrico (Vol), profundidade de secchi (Sec), condutividade elétrica (CE), potencial hidrogeniônico (pH), oxigênio dissolvido (OD), turbidez (Turb), sólidos suspensos totais (SST), fósforo total (TP), amônia (NH<sub>4</sub>), fósforo reativo solúvel (FRS), clorofila (Chl-a).



**Figura 14.** Classificação do Estado Trófico dos Reservatórios de Boqueirão de Parelhas e Passagem das Traíras ao longo dos períodos monitorados evidenciando a área de drenagem. Em vermelho estado eutrófico, em amarelo mesotrófico.

### 3.4. Discussão

Este estudo mostra a intensificação da eutrofização dos corpos hídricos do semiárido devido à seca prolongada registrada nos períodos estudados. Com isso foi também evidenciado a alteração da classificação trófica com impactos principalmente no aumento nas concentrações de nutrientes e biomassa algal.

Os resultados deste estudo convergem com o exposto por Moss et al., (2011), quando afirma que as alterações no regime de precipitação e evaporação causadas pelas mudanças climáticas agravam o fenômeno da eutrofização, uma vez que em situação que resulte em balanço hídrico negativo decorrente do aquecimento combinado com a redução da precipitação, pode proceder no aumento da concentração de nutrientes em função do aporte autóctone do sistema; aumento da mineralização; e o conseqüente aumento da biomassa algal (MOSS et al., 2011). Ainda, os efeitos da variabilidade de precipitação na qualidade de água podem ser em função do aumento de material alóctone durante o período de chuvas intensas (MOSS et al., 2011; NOBRE et al., 2020).

A diminuição das chuvas, quando comparada a sua climatologia, contribuiu para a intensificação da eutrofização com aumento na concentração de nutrientes, biomassa algal, condutividade elétrica, e sólidos totais em suspensão, padrão evidenciado em vários estudos da mesma região semiárida em período de evento extremo de seca (GOMES et al., 2015; COSTA et al., 2016; MENDONÇA JÚNIOR et al., 2018; FIGUEIREDO; BECKER, 2018).

É pertinente observar que a intensificação das secas agrava a situação da qualidade hídrica dos reservatórios da região semiárida, e estes eventos tendem a serem intensificados nas próximas décadas (IPCC, 2014). De modo que, durante a intensificação da seca, identificada neste estudo, o reservatório de Boqueirão apresentou um processo acelerado de eutrofização, alterando o estado de trofia de mesotrófico para eutrófico, com elevadas quantidades de nutrientes (Figura 14).

Enquanto isso, o reservatório de Passagem das Traíras, classificado desde o início do estudo como eutrófico, manteve seu estado trófico, contudo, houve aumento da sua disponibilidade de nutrientes com a diminuição de seu volume hídrico e da área de drenagem.

A entrada de sedimentos transportados ao corpo hídrico e o baixo volume de água, aumenta a concentração de sólidos suspensos totais, e ocasiona aumento de

turbidez (MEDEIROS et al., 2015). Outrossim, a transparência de secchi quando menor, pode ocorrer devido a maior concentração algal e do baixo volume de água nos reservatórios (MENDONÇA JÚNIOR et al., 2018), sendo o que, possivelmente, ocorreu neste trabalho, onde os reservatórios (Boqueirão e Passagem das Traíras) apresentaram resposta similar das variáveis limnológicas as variações do volume dos reservatórios.

O prolongamento da seca levou a mudanças nas condições químicas dos reservatórios, tendo como resultado, a redução do volume de água e aumento na condutividade elétrica (CE). A consequência desta situação resulta em salinização dos mananciais e ameaça o suprimento de água da região, assim como o que ocorreu no lago Doirani, Grécia (clima mediterrâneo semiárido quente) (JEPPESEN et al., 2015), reafirmando o exposto neste trabalho, onde ambos os reservatórios (Boqueirão e Passagem das Traíras) apresentaram correlação negativa da CE com o volume de água e reforçada na análise de componentes principais.

Brasil et al. (2016), apontam no seu estudo que apesar da falta de precipitação e suprimento externo de nutrientes ao longo de períodos de seca, as concentrações de compostos nitrogenados e fosfatados (amônia; nitrato; fósforo total e fósforo reativo solúvel) tendem a aumentar, potencialmente relacionados a processos internos (evaporação, decomposição e carga interna), sendo o que provavelmente ocorreu para o aumento da concentração destes compostos, ao longo do nosso estudo.

prolongamento da seca (resultando em redução do volume de água nos reservatórios, e aumento do aporte autóctone do sistema) aliado ao mau uso e ocupação do solo poderá agravar ainda mais o processo da degradação dos corpos hídricos no semiárido tropical (BOUVY et al., 1999; BOUVY et al., 2003; SMITH, 2003; GOMES, 2016). Pois, o prolongamento da seca tende a aumentar a concentração de nutrientes, diminuindo a transparência da água e favorecendo a intensificação da eutrofização dos reservatórios da região (ROLAND et al., 2012; SARMENTO et al., 2013; BRASIL et al. 2016; ROCHA JÚNIOR et al., 2018).

Em resumo, o presente estudo mostrou que o prolongamento da seca afeta negativamente a quantidade e a qualidade da água dos reservatórios do semiárido, agravando os sintomas de eutrofização. O prolongamento da seca, decorrente da alteração do regime de precipitação no tempo, resultou em mudanças nas variáveis

limnológicas, tornando ainda pior a qualidade da água dos reservatórios estudados. No reservatório de Boqueirão, o estado trófico alterou de mesotrófico para eutrófico. Ainda, em função do aumento da frequência de eventos prolongados de seca, em função das mudanças climáticas projetadas, para a região semiárida, nossos resultados sugerem que será reduzida a quantidade e a qualidade da disponibilidade hídrica dos reservatórios da região semiárida.

### 3.5. Referências

APHA – AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 20th ed. Washington: APHA, AWWA, W.E.F. Washington, 2005.

APHA – AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. Standard methods for the examination of water and waste-water. 22th ed. Washington: APHA, AWWA, W.E.F. Washington, 2012.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; DE MORAES, G.; LEONARDO, J.; SPAROVEK, G.. Köppen's climate classification map for Brazil. Meteorologische Zeitschrift, 22(6), 711-728, 2013.

ANA – Agência Nacional de Águas. Plano de Recursos Hídricos Piancó-Piranhas-Açu. Resumo Executivo. Brasília: 2016.

ANA – Agência Nacional de Águas. Monitor de Secas. Disponível em: <<http://monitordesecas.ana.gov.br/>>. Acesso em 5 de fevereiro de 2019.

ARFI, R. The effects of climate and hydrology on the trophic status of Sélingué reservoir, Mali, West Africa. Lakes and Reservoirs: Research and Management, v. 8, n. 3, p. 3-4, 2003. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1440-1770.2003.00223.x>

BARBOSA, J.E.L., MEDEIROS, E.S.F.M., BRASIL, J., CORDEIRO, R.S., CRISPIM, M.C.B. and SILVA, G.H.G. Aquatic systems in semi-arid Brazil: limnology and management. Acta Limnologica Brasiliensia, 2012, v.24, n.1, p. 103-118. <http://dx.doi.org/10.1590/S2179-975X2012005000030>.

BEKLIOGLU, M.; ROMO, S.; KAGALOU, I., QUINTANA, X.; BÉCARES, E. . State of the art in the functioning of shallow Mediterranean lakes: workshop conclusions. Hydrobiologia, v. 584, n.1, p. 317-326, 2007. <http://dx.doi.org/10.1007/s10750-007-0577-x>

BENNETT, E.M., CARPENTER, S.R., CARACO, N.F.. Human impact on erodible phosphorus and eutrophication: a global perspective: increasing accumulation of phosphorus in soil threatens rivers, lakes, and coastal oceans with eutrophication. AIBS Bull. V. 51, n. 3, p. 227–234, 2001.

BRAGA, G. G.; BECKER, V.; MATTOS, A. Os efeitos da seca prolongada no processo de eutrofização de um manancial da região semiárida. In: SÍMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 21., 2015, Brasília. Anais... Brasília: ABRH, 2015. Available from: <[http://www.evolvedoc.com.br/sbrh/detalhes-818\\_os-](http://www.evolvedoc.com.br/sbrh/detalhes-818_os-)

efeitos-da-seca-prolongada-no-processo-de-eutrofizacao-de-um-manancial-da-regiao-semiarida>. Access on: 13 Oct. 2019.

BRASIL, J.; ATTAYDE, J. L.; VASCONCELOS, F. R.; DANTAS, D. D.; HUSZAR, V. L.. Drought-induced water-level reduction favors cyanobacteria blooms in tropical shallow lakes. *Hydrobiologia*, v.770, n. 1, p. 145-164, 2015. <http://dx.doi.org/10.1007/s10750-015-2578-5>

BOUVY, M.; MOLICA, R.; OLIVEIRA, S.; MARINHO, M.; BEKER, B. Dynamics of a toxic cyanobacterial bloom (*Cylindrospermopsis raciborskii*) in a shallow reservoir in the semi-arid region of northeast Brazil. *Aquatic Microbial Ecology*. v. 20, p. 285-297. 1999. <https://dx.doi.org/10.3354/ame020285>

BOUVY, M.; NASCIMENTO, S. M.; MOLICA, R. J. R.; FERREIRA, A.; HUSZAR, V.; AZEVEDO, S. M. F. O. Limnological features in Tapacurá reservoir (northeast Brazil) during a severe drought. *Hydrobiologia*. v. 493, n. 1-3, p. 115-130. 2003. <https://dx.doi.org/10.1023/A:1025405817350>

COSTA, M.R.A., ATTAYDE, J.L. and BECKER, V. Effects of water level reduction on the dynamics of phytoplankton functional groups in tropical semi-arid shallow lakes. *Hydrobiologia*, 778(1), 75-89, 2016. <http://dx.doi.org/10.1007/s10750-015-2593-6>.

COSTA, M.R.A., MENEZES, R.F., SARMENTO, H., ATTAYDE, J.L., STERNBERG, L.S.L. and BECKER, V. Extreme drought favors potential mixotrophic organisms in tropical semi-arid reservoir. *Hydrobiologia*, 831(1), 43-54, 2019. <http://dx.doi.org/10.1007/s10750-018-3583-2>.

CUNHA, A.P.M.A.; ZERI, M.; LEAL, K.D.; COSTA, L.; CUARTAS, L.A.; MARENGO, J.A.; TOMASELLA, J.; VIEIRA, R.M.; BARBOSA, A.A.; CUNNINGHAM, C.C.; GARCIA, J.V.C.; BROEDEL, E.; ALVALÁ, R.C.; RIBEIRO NETO, G.. Extreme Drought Events over Brazil from 2011 to 2019. *Atmosphere*, v.10, n.11, p. 1-20, 2019.

DE JONGE, V.N., ELLIOTT, M., ORIVE, E.. Causes, historical development, effects and future challenges of a common environmental problem: eutrophication. *Hydrobiologia* 475 (1), 1–19, 2002. <https://doi.org/10.1023/A:1020366418295>.

DODDS, W.K., BOUSKA, W.W., EITZMANN, J.L., PILGER, T.J., PITTS, L., RILEY, A.J., SCHLOESSER, J.T., THORNBRUGH, D.J., PITTS, K.L., RILEY, A.J., SCHLOESSER, J.T., THORNBRUGH, D.J. Eutrophication of U. S. Freshwaters: Analisis of Potential Economic Damages. *Environ. Sci. Technol.* 43, 12–19, 2009. <https://doi.org/doi:10.1021/es801217q> .

FIGUEIREDO, A. V.; BECKER, V.; MATTOS, A.. O efeito da seca prolongada na qualidade da água do reservatório gargalheiras na região tropical semiárida. In: SÍMPOSIUM DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 12., 2014, Natal. Anais... Brasília: ABRH, 2014. Available from:< <http://eventos.abrh.org.br/xiisrh/anais/>>. Access on: 28 Dec. 2019.

FIGUEIREDO, A.L., BECKER, V. Influence of extreme hydrological events in the quality of water reservoirs in the semi-arid tropical region. *Brazilian Journal of Water Resources*, v.23, n.53, p. 1-8 2018. <http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.231820180088>

GOMES, S. S. Alteração do estado trófico durante um evento de seca prolongada e seus impactos na biomassa algal de um manancial tropical da região semiárida. 34f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

GUTIÉRREZ, A.P.A., ENGLE, N.L., DE NYS, E., MOLEJON, C., MARTINS, E.S. Drought preparedness in Brazil. *Weather Clim Extremes* 3:95–106. 2014. doi:10.1016/j.wace.2013.12.001

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Summary for policymakers. In: FIELD, C. B.; BARROS, V. R.; DOKKEN, D. J.; MACH, K. J.; MASTRANDREA, M. D.; BILIR, T. E.; CHATTERJEE, M.; EBI, K. L.; ESTRADA, Y. O.; GENOVA, R. C.; GIRMA, B.; KISSEL, E. S.; LEVY, A. N.; MACCRACKEN, S.; MASTRANDREA, P. R.; WHITE, L. L. (Eds.). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2014. p. 1-32.

JEPPESEN, E.; BRUCET, S.; NASELLI-FLORES, L.; PAPASTERGIADOU, E.; STEFANIDIS, K.; NOGES, T.; BUCAK, T.. Ecological impacts of global warming and water abstraction on lakes and reservoirs due to changes in water level and related changes in salinity. *Hydrobiologia*, v. 750, n.1, p. 201-227, 2015. <http://dx.doi.org/10.1007/s10750-014-2169-x>

JEPPESEN, E.; KRONVANG, B.; MEERHOFF, M.; SØNDERGAARD, M.; HANSEN, K. M.; ANDERSEN, H. E.; OLESEN, J. E.. Climate change effects on runoff, catchment phosphorus loading and lake ecological state, and potential adaptations. *Journal of Environmental Quality*, v. 38, n.5, p. 1930-1941, 2009. <https://doi.org/10.2134/jeq2008.0113>

JEPPESEN, E.; MOSS, B.; BENNION, H.; CARVALHO, L.; DE MEESTER, L.; FEUCHTMAYR, H.; FRIBERG, N.; GESSNER, M.O.; HEFTING, M.; LAURIDSEN, T.L.; LIBORIUSSEN, L.; MALMQUIST, H.J.; MAY, LINDA.; MEERHOFF, M.; OLAFSSON, J.S.; SOONS, M.B.; VERHOEVEN, T.A.. Interaction of climate change and eutrophication. In: Kernan M, Battarbee RW, Moss B, editors. *Climate change impacts on freshwater ecosystems*. Chichester (UK): Wiley-Blackwell. p. 119–151. 2010. <https://doi.org/10.1002/9781444327397.ch6>

JESPERSEN, A.M.; KCHRISTOFFERSEN,. Measurements of chlorophyll-a from phytoplankton using ethanol as extraction solvent. *Hydrobiologia*, v. 109: p. 445-454, 1987.

MARENGO, J. A.; VALVERDE, M. C.. Caracterização do clima no Século XX e Cenário de Mudanças de clima para o Brasil no Século XXI usando os modelos do IPCC-AR4. *Revista Multiciência*, 8, 5-28, 2007.

MARENGO, J.A.; JONES, R.; ALVES, L.M.; VALVERDE, M.C.. Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate modeling system. *International Journal of Climatology*, v.29, n.15, p.2241-2255. <http://dx.doi.org/10.1002/joc.1863>.

MARENGO, J.A.; BERNASCONI, M.. Regional differences in aridity/ drought conditions over Northeast Brazil: present state and future projections. *Clim Chang* v.129, p. 103–115. 2015. doi:10.1007/s10584-014- 1310-1

MARENGO, J.A.; TORRES, R.R.; ALVES, L.M.. Drought in Northeast Brazil – past, present, and future. *Theor. Appl. Climatol.* v. 129, n. 3-4, p. 1189–1200, 2016. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1840-8>

MARENGO JA, ALVES LM, SOARES WR, RODRIGUEZ DA, CAMARGO H, RIVEROS MP, PABLÓ AD. Two contrasting severe seasonal extremes in tropical South America in 2012: flood in Amazonia and drought in Northeast Brazil. *J Clim* v.26, n. 22, p. 9137–9154. 2013. <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00642.1>

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

MEDEIROS, L. C.; MATTOS, A.; LURLING, M.; BECKER, V.. Is the future blue-green or brown? The effects of extreme events on phytoplankton dynamics in a semi-arid man-made lake. *Aquatic Ecology*, v. 49, n. 3, p. 293-307, 2015. <http://dx.doi.org/10.1007/s10452-015-9524-5>.

MENDONÇA JÚNIOR, J. R.; AMADO, A.M.; VIDAL, O.L.; MATTOS, A.; BECKER, V.. Extreme droughts drive tropical semi-arid eutrophic reservoirs towards CO<sub>2</sub> sub-saturation. *Acta Limnologica Brasiliensia (Online)*, v. 30, n.e101, 2018. <http://dx.doi.org/10.1590/S2179-975X1517>.

MOSLEY, L. M. Drought impacts on the water quality of freshwater systems; review and integration. *Earth Sci. Rev.* v. 140, p. 203–214, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.11.010>

MOSS, B.; KOSTEN, S.; MEERHOFF, M.; BATTARBEE, R. W.; JEPPESEN, E.; MAZZEO, N.; HAVENS, K.; LACEROT, G.; LIU, Z.; DE MEESTER, L.; PAERL, H.; SCHEFFER, M. Allied attack: climate change and eutrophication. *Inland Waters*, v. 1, n. 2, p. 101-105, 2011.

MULLER, R.; WIDEMANN, O. Die Bestimmung des Nitrat-Ion in Wasser. *Von Wasser*, v. 22, p. 247-271, 1955.

MURPHY, J.; RILLEY, J.P. A modified single-solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta*, 27: 31-36, 1962.

NASELLI-FLORES, L.; BARONE, R. Steady-state assemblages in a Mediterranean hypertrophic reservoir. The role of *Microcystis* ecomorphological variability in maintaining an apparent equilibrium. *Hydrobiologia*, v. 502, n. 1-3, p. 133-143, 2003.

NASELLI-FLORES, L.; BARONE, R. Water-level fluctuations in Mediterranean reservoirs: setting a dewatering threshold as a management tool to improve water quality. *Hydrobiologia*, v. 548, n. 1, p. 85-99, 2005. <http://dx.doi.org/10.1007/s10750-005-1149-6>.

NOBRE, R. L. G.; CALIMAN, A.; CABRAL, C. R.; ARAÚJO, F.C.; GUÉRIN, J.; DANTAS, F.C.C.; QUESADO, L.B.; VENTICINQUE, E.M.; GUARIENTO, R.D.; AMADO, A.M.; KELLY, P.; VANNI, M.J.; CARNEIRO, L.S.. Precipitation, landscape properties and land use interactively affect water quality of tropical freshwaters. *Science of The Total Environment*, p. 1-45, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137044>

Özen, A.; Karapınar, B.; Kucuk, İ.; Jeppesen, E.; Beklioglu, M.. Drought-induced changes in nutrient concentrations and retention in two shallow Mediterranean lakes subjected to different degrees of management. *Hydrobiologia* v. 646, n.1, p. 61–72, 2010. <http://dx.doi.org/10.1007/s10750-010-0179-x>

RABALAIS, N.N.; TURNER, R.E.; SCAVIA, D.. Beyond science into policy: Gulf of Mexico hypoxia and the Mississippi River. *Bioscience*, v. 52, n. 2, p.129–142, 2002. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2002\)052%5b0129:BSIPGO%5d2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2002)052%5b0129:BSIPGO%5d2.0.CO;2)

ROCHA JÚNIOR, C. A. N.; COSTA, M. R. A.; MENEZES, R. F.; ATTAYDE, J. L.; BECKER, V. Water volume reduction increases eutrophication risk in tropical semi-arid reservoirs. *Acta Limnologica Brasiliensia (Online)*, v. 30, n. e106, 2018. <http://dx.doi.org/10.1590/S2179-975X2117>.

ROLAND, F.; HUSZAR, V.L.M.; FARJALLA, V.F.; ENRICH-PRAST, A.; AMADO, A.; OMETTO, J.P.H.B.. Climate change in Brazil: perspective on the biogeochemistry of inland waters. *Brazilian Journal of Biology = Revista Brasileira de Biologia*, v. 72, n.3, p. 709-722. Supplement. 2012. <http://dx.doi.org/10.1590/S1519-69842012000400009>. PMID:23011300.

SARMENTO, H.; AMADO, A.M.; DESCY, J.P.. Climate change in tropical fresh waters (comment on the paper 'Plankton dynamics under different climatic conditions in space and time' by de Senerpont Domis et al., 2013). *Freshwater Biology*, v.58, n.10, p. 2208-2210, 2013. <http://dx.doi.org/10.1111/fwb.12203>.

SCHINDLER, D.W. Recent advances in the understanding and management of eutrophication. *Limnol. Oceanogr.* V.51, p. 356–363, 2006. [https://doi.org/10.4319/lo.2006.51.1\\_part\\_2.0356](https://doi.org/10.4319/lo.2006.51.1_part_2.0356)

SEMARH - Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos do Rio Grande do Norte. Disponível em: <<http://www.semarh.rn.gov.br/>>. Acesso em 5 de fevereiro de 2019.

SMETACEK, V.; ZINGONE, A. Green and golden seaweed tides on the rise. *Nature* v. 504, p. 84–88, 2013. <https://doi.org/10.1038/nature12860>

SMITH, V. H. Eutrophication of freshwater and coastal marine ecosystems a global problem. *Environmental Science and Pollution Research*, [s.l.], v. 10, n. 2, p.126-139. Springer Science and Business Media LLC. 2003. <http://dx.doi.org/10.1065/espr2002.12.142>

SMITH, V. H.; SCHINDLER, D.W.. Eutrophication science: where do we go from here? *Trends in Ecology and Evolution*, v. 24, n. 4, p. 201-207. 2009.

SOARES, M. C. S.; MARINHO, M. M.; AZEVEDO, S. M. F. O.; BRANCO, C. W. C.; HUSZAR, V. L. M. Eutrophication and retention time affecting spatial heterogeneity in a tropical reservoir. *Limnologica*, v. 42, n. 3, p. 197-203, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.limno.2011.11.002>.

TUNDISI, J. G.; MATSUMURA-TUNDISI, T.. Eutrophication of lakes and reservoirs: a comparative analysis, case studies, perspectives, pp 1-33. In: Cordeiro-Marino (Ed.). *Algae and Environment: A general Approach*. Brazilian Phycological Society. 1992.

THORNTON J.A.; RAST W.. A test of hypotheses relating to the comparative limnology and assessment of eutrophication in semi-arid man-made lakes. In:

Straskraba M, Tundise JG, Duncan A (eds) *Comparative Reservoir Limnology and Water Quality Management*. Kluwer Academic Publishers, London, 1–24, 1993. [https://doi.org/10.1007/978-94-017-1096-1\\_1](https://doi.org/10.1007/978-94-017-1096-1_1).

VALDERRAMA, J.C.. The simultaneous analysis of total nitrogen and phosphorus in natural waters. *Marine Chemistry* v.10, p. 109-122, 1981.

VIANA, C.F.G., 2013. *Da Seca como Episódio à Desertificação como Processo: uma questão (não) institucionalizada*. Center of Sustainable Development, University of Brasilia, Brazil.

VIEIRA R.M.S.P, Tomasella J, Alvala RCS, Sestini MF, Affonso AG, Rodriguez DA, Barbosa AA, Cunha APMA, Valles GF, Crepani E, de Oliveira SBP, de Souza MSB, Calil PM, de Carvalho MA, Valeriano DM, Campello FCB, Santana MO (2015) Identifying areas susceptible to desertification in the Brazilian northeast. *Solid Earth* 6:347–360. 2015. <https://doi.org/10.5194/se-6-347-2015>

WORLD BAN. *Water Resources Planning and Adaptation to Climate Variability and Climate Change in Selected River Basins in Northeast Brazil*. Final Report on a Non Lending Technical Assistance program (P123869). World Bank, Washington DC. , 2013.

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho dedicou-se a investigar o impacto da seca prolongada em mananciais do semiárido tropical localizados no nordeste brasileiro, região vulnerável a eventos extremos como a seca extrema. Diante disso, através da pesquisa foi possível verificar que a seca prolongada recente (2012-2019), enfrentada em parte do semiárido brasileiro refletiu negativamente na quantidade e qualidade da água dos corpos hídricos da região.

Classificar o tipo da seca meteorológica ou hidrológica é um procedimento, relativamente, complexo. O índice de precipitação padronizada (SPI) em conjunto com os dados de volume hídrico dos reservatórios, e o auxílio de estatísticas proporcionou direcionar qual a escala mensal do índice de precipitação padronizada (SPIMM) melhor se correlaciona com a variação volumétrica dos reservatórios, e assim obter como resultado uma classificação de seca mais próxima à realidade dos ambientes estudados. Assim, definir qual a intensidade da seca ao longo do tempo, proporciona uma melhor leitura da situação hídrica, tanto na qualidade como na quantidade. Esse procedimento de definição facilita comparar períodos distintos em função da atual situação de seca.

Com auxílio do SPI foi possível classificar qual o tipo de seca que estava ocorrendo nas regiões dos reservatórios estudados, bem como avaliá-las. Vale destacar que foi constatado que o período que compreende os anos de 2012 a 2019 foi o mais longo período de seca do estudo, no qual, os reservatórios de Boqueirão e Passagem das Traíras enfrentaram a seca meteorológica e hidrológica mais extensa da série histórica disponível.

Nesse sentido, o presente estudo buscou, também, avaliar a consequência desta seca prolongada na qualidade da água dos reservatórios, e foi verificada piora na qualidade da água, em ambos os reservatórios. Ressalta-se, diante dos resultados que o prolongamento da seca piorou a qualidade da água dos reservatórios, uma vez que, durante o estudo houve redução do volume hídrico e transparência da água, e aumento da concentração de nutrientes (PT, FRS,  $\text{NO}_3^-$ ), turbidez, sólidos suspensos totais, condutividade elétrica, quando comparado o início da seca (Período I; aos períodos II e III (SANTOS, et al. 2020; Capítulo 2)).

O prejuízo qualitativo do reservatório de Boqueirão foi apresentado, havendo uma alteração de estado trófico, registrando uma intensificação da eutrofização

durante o prolongamento da seca. Já o reservatório de Passagem das Traíras classificado desde o início do estudo como eutrófico, manteve seu estado trófico de aumentar a sua disponibilidade de nutrientes com a diminuição de seu volume hídrico.

Vale salientar, que entender os impactos da seca nos reservatórios, bem como seus efeitos na qualidade e quantidade da água pode ser um meio facilitador para melhor gerenciar os recursos hídricos da região, como também um meio importante na tomada de decisões para atenuar o impacto da seca na população que depende dos reservatórios para o abastecimento humano, pesca, dessedentação animal e outros.

## 5. REFERÊNCIAS

- ALPINO, T.A.; SENA, A.R.M.; FREITAS, C.M.. 2016. Disasters related to droughts and public health-a review of the scientific literature. *Ciênc. saúde coletiva*, v.21, n.3, p. 809-820, 2016. <https://doi.org/10.1590/1413-81232015213.21392015>
- BRASIL, J.; ATTAYDE, J. L.; VASCONCELOS, F. R.; DANTAS, D. D.; HUSZAR, V. L.. Drought-induced water-level reduction favors cyanobacteria blooms in tropical shallow lakes. *Hydrobiologia*, v.770, n. 1, p. 145-164, 2015. <http://dx.doi.org/10.1007/s10750-015-2578-5>
- COSTA, M.R.A., ATTAYDE, J.L. and BECKER, V. Effects of water level reduction on the dynamics of phytoplankton functional groups in tropical semi-arid shallow lakes. *Hydrobiologia*, 778(1), 75-89, 2016. <http://dx.doi.org/10.1007/s10750-015-2593-6>.
- COSTA, M.R.A., MENEZES, R.F., SARMENTO, H., ATTAYDE, J.L., STERNBERG, L.S.L. and BECKER, V. Extreme drought favors potential mixotrophic organisms in tropical semi-arid reservoir. *Hydrobiologia*, 831(1), 43-54, 2019. <http://dx.doi.org/10.1007/s10750-018-3583-2>.
- COSTA, R. L.; BAPTISTA, G. M. M.; GOMES, H. B.; SILVA, F. D. S.; ROCHA JÚNIOR, R.L, SALVADOR, M.A.; HERDIES, D. L.. Analysis of climate extremes indices over northeast Brazil from 1961 to 2014. *Weather and Climate Extremes*, v.28, n.00254, p. 1-21, 2020. <https://dx.doi.org/10.1016/j.wace.2020.100254>
- DODDS, W.K., BOUSKA, W.W., EITZMANN, J.L., PILGER, T.J., PITTS, L., RILEY, A.J., SCHLOESSER, J.T., THORNBRUGH, D.J., PITTS, K.L., RILEY, A.J., SCHLOESSER, J.T., THORNBRUGH, D.J. Eutrophication of U. S. Freshwaters: Analisis of Potential Economic Damages. *Environ. Sci. Technol.* 43, 12–19, 2009. <https://doi.org/doi:10.1021/es801217q> .
- FRANCHINI, M.; MANNUCCI, P.M.. 2015. Impact on human health of climate changes. *Eur. J. Int. Med.* v. 26, n. 1, p.1–5, 2015.

FRANCHITO, S.H.; FERNANDEZ, J.P.R.; PAREJA, D.. Surrogate climate change scenario and projections with a regional climate model: impact on the aridity in South America. *Am J Clim Chang*, v.3, n.5, p. 474–489, 2014.

FIGUEIREDO, A.L., BECKER, V. Influence of extreme hydrological events in the quality of water reservoirs in the semi-arid tropical region. *Brazilian Journal of Water Resources*, 23, e53, 2018.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Summary for policymakers. In: FIELD, C. B.; BARROS, V. R.; DOKKEN, D. J.; MACH, K. J.; MASTRANDREA, M. D.; BILIR, T. E.; CHATTERJEE, M.; EBI, K. L.; ESTRADA, Y. O.; GENOVA, R. C.; GIRMA, B.; KISSEL, E. S.; LEVY, A. N.; MACCRACKEN, S.; MASTRANDREA, P. R.; WHITE, L. L. (Eds.). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press. p. 1-32, 2014.

JEPPESEN, E.; MOSS, B.; BENNION, H.; CARVALHO, L.; DE MEESTER, L.; FEUCHTMAYR, H.; FRIBERG, N.; GESSNER, M.O.; HEFTING, M.; LAURIDSEN, T.L.; LIBORIUSSEN, L.; MALMQUIST, H.J.; MAY, LINDA.; MEERHOFF, M.; OLAFSSON, J.S.; SOONS, M.B.; VERHOEVEN, T.A.. Interaction of climate change and eutrophication. In: Kernan M, Battarbee RW, Moss B, editors. *Climate change impacts on freshwater ecosystems*. Chichester (UK): Wiley-Blackwell. p. 119–151. 2010. <https://doi.org/10.1002/9781444327397.ch6>

JEPPESEN, E.; BRUCET, S.; NASELLI-FLORES, L.; PAPASTERGIADOU, E.; STEFANIDIS, K.; NOGES, T.; BUCAK, T.. Ecological impacts of global warming and water abstraction on lakes and reservoirs due to changes in water level and related changes in salinity. *Hydrobiologia*, v. 750, n.1 , p. 201-227, 2015. <http://dx.doi.org/10.1007/s10750-014-2169-x>

JOETZJER, E.; DOUVILLE, H.; DELIRE, C.; CIAIS, P.; DECHARME, B.; TYTECA, S.. Hydrologic benchmarking of meteorological drought indices at interannual to climate change timescales: a case study over the Amazon and Mississippi river basins. *Hydrol Earth Syst Sci*, v.17, p. 4885–4895, 2013. <https://dx.doi.org/10.5194/hess-17-4885-2013>.

LI, B.; RODELL, M.. Evaluation of a model-based groundwater drought indicator in the conterminous U.S. *J Hydrol*, v.526, p. 78–88, 2014. <https://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.09.027>.

MARENGO J.A.; BERNASCONI, M.. Regional differences in aridity/drought conditions over Northeast Brazil: present state and future projections. *Clim Chang*, v.129, n.1 e 2, p. 103-115, 2015. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1310-1>.

MARENGO, J.A.; TORRES, R.R.; ALVES, L.M.. Drought in Northeast Brazil – past, present, and future. *Theor. Appl. Climatol*. v. 129, n. 3-4 p. 1189–1200, 2016.

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

MEDEIROS, L. C.; MATTOS, A.; LURLING, M.; BECKER, V.. Is the future blue-green or brown? The effects of extreme events on phytoplankton dynamics in a semi-

arid man-made lake. *Aquatic Ecology*, v. 49, n. 3, p. 293-307, 2015. <http://dx.doi.org/10.1007/s10452-015-9524-5>.

MIKA, J.; HORVÁTH, S.; MAKRA, L.; DUNKEL, Z.. The Palmer Drought Severity Index (PDSI) as an indicator of soil moisture. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, v.30, n.1-3, p. 223–230, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2004.08.036>

MOSLEY, L. M. Drought impacts on the water quality of freshwater systems; review and integration. *Earth Sci. Rev.* 140, 203–214, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.11.010>

NALBANTIS, I.; TSAKIRIS, G.. Assessment of hydrological drought revisited. *Water Resour Manag*, v.23, p. 881–897, 2009. . <https://dx.doi.org/10.1007/s11269-008-9305-1>.

NASELLI-FLORES, L.; BARONE, R. Water-level fluctuations in Mediterranean reservoirs: setting a dewatering threshold as a management tool to improve water quality. *Hydrobiologia*, v. 548, n. 1, p. 85-99, 2005. <http://dx.doi.org/10.1007/s10750-005-1149-6>.

NOBRE, C. A.; SAMPAIO, G.; SALAZAR, L.. Mudanças climáticas e Amazônia. *Ciência e Cultura*, v.59, n.3, p. 22-27, 2007.

PALMER W.C.. Meteorological Drought. Weather Bureau. Research Paper, U.S. Department of Commerce Weather Bureau, Washington, DC, n. 45 p.58, 1965

REBOUÇAS, A.C.. Água na região Nordeste: desperdício e escassez. *Instituto de Estudos Avançados da Universidade de São Paulo*, v.11, n.29, p. 127-154, 1997. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-40141997000100007>

ROCHA JÚNIOR, C. A. N.; COSTA, M. R. A.; MENEZES, R. F.; ATTAYDE, J. L.; BECKER, V. Water volume reduction increases eutrophication risk in tropical semi-arid reservoirs. *Acta Limnologica Brasiliensia (Online)*, v. 30, n. e106, 2018. <http://dx.doi.org/10.1590/S2179-975X2117>.

ROCHA JÚNIOR, R. L.; SILVA, F. D. S.; COSTA, R. L.; GOMES, H. B.; HERDIES, D. L., SILVA, V. P.R.; XAVIER, A.C.). Analysis of the Space–Temporal Trends of Wet Conditions in the Different Rainy Seasons of Brazilian Northeast by Quantile Regression and Bootstrap Test. *Geosciences*, v. 9, n. 11, 457, p 1-14, 2019 . <http://dx.doi.org/10.3390/geosciences9110457>

SALVADOR, C.; NIETO, R.; LINARES, C.; DIAZ, J.; GIMENO, L.. Effects of droughts on health: Diagnosis, repercussion, and adaptation in vulnerable regions under climate change. *Challenges for future research. Science of The Total Environment*. v. 703, p. 1-8, 2019.

SOARES, M. C. S.; MARINHO, M. M.; AZEVEDO, S. M. F. O.; BRANCO, C. W. C.; HUSZAR, V. L. M. Eutrophication and retention time affecting spatial heterogeneity in a tropical reservoir. *Limnologica*, v. 42, n. 3, p. 197-203, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.limno.2011.11.002>.

VAN LOON, A. F.. Hydrological drought explained. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, v.2, n.4, p. 359–392, 2015. <https://dx.doi.org/10.1002/wat2.1085>

VICENTE-SERRANO, S. M.; BEGUERÍA, S.; LÓPEZ-MORENO, J. I.. A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate*, v.23, n.7, p.1696–1718. 2010. <http://dx.doi.org/10.1175/2009jcli2909.1>

VICENTE-SERRANO, S. M.; AZORIN-MOLINA, C.; SANCHEZ-LORENZO, A.; REVUELTO, J., MORÁN-TEJEDA, E.; LÓPEZ-MORENO, J. I.; & ESPEJO, F. (2014). Sensitivity of reference evapotranspiration to changes in meteorological parameters in Spain (1961-2011). *Water Resources Research*, v.50, n.11, p.8458–8480, 2014. <http://dx.doi.org/10.1002/2014wr015427>

ZHAI, J.; BUDA, S.; KRYSANOVA, V.; VETTER, T.; GAO, C.; JIANG, T.. Spatial Variation and Trends in PDSI and SPI Indices and Their Relation to Streamflow in 10 Large Regions of China. *J Clim*, v.23, p. 649–663, 2010. . <https://dx.doi/10.1175/2009JCLI2968.1>.