

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS  
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

IRIS LAYANNE NOBRE FRANÇA

**EFEITO DA VARIABILIDADE CLIMÁTICA SOBRE OS BAIXOS NÍVEIS DE  
RESERVATÓRIOS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO**

MACEIÓ – AL

2022

**IRIS LAYANNE NOBRE FRANÇA**

**EFEITO DA VARIABILIDADE CLIMÁTICA SOBRE OS BAIXOS NÍVEIS DE  
RESERVATÓRIOS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, do Instituto de Ciências Atmosféricas, da Universidade Federal de Alagoas, como um dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Meteorologia.

Orientadora: Profa Dra. Djane Fonseca da Silva.

MACEIÓ – AL

2022

**Catálogo na fonte**  
**Universidade Federal de Alagoas**  
**Biblioteca Central**  
**Divisão de Tratamento Técnico**

Bibliotecária: Taciana Sousa dos Santos – CRB-4 – 2062

F815e França, Iris Layanne Nobre.

Efeito da variabilidade climática sobre os baixos níveis de reservatórios na bacia hidrográfica do rio São Francisco / Iris Layanne Nobre França. – 2022.  
98 f. : il. color.

Orientadora: Djane Fonseca da Silva.

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Alagoas. Instituto de Ciências Atmosféricas. Programa de Pós-Graduação em Meteorologia. Maceió, 2022.

Bibliografia: f. 84-98.

1. Extremos climáticos. 2. Precipitação (Meteorologia). 3. Secas. 4. Bacia hidrográfica - Rio São Francisco. 5. Climatologia. 6. Ondeletas. I. Título.

CDU: 551.58



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS**  
**INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**  
**COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA**

**CERTIFICADO DE APRESENTAÇÃO**

**N.º de ordem: MET-UFAL-MS-193.**

***“EFEITO DA VARIABILIDADE CLIMÁTICA SOBRE OS BAIXOS NÍVEIS DE RESERVATÓRIOS NA BACIA  
HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO.”***

**IRIS LAYANNE NOBRE FRANÇA**

Dissertação submetida ao colegiado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Alagoas - UFAL, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Meteorologia.

Aprovado pela Banca Examinadora composta por:



Documento assinado digitalmente  
DJANE FONSECA DA SILVA  
Data: 22/06/2022 16:44:01-0300  
Verifique em <https://verificador.iti.br>

---

**Profa. Dra. Djane Fonseca da Silva**  
**(Orientadora)**



Documento assinado digitalmente  
MARIA LUCIENE DIAS DE MELO  
Data: 22/06/2022 10:52:36-0300  
Verifique em <https://verificador.iti.br>

---

**Profa. Dra. Maria Luciene Dias de Melo**  
**(Membro Interno)**



Documento assinado digitalmente  
HENRIQUE RAVI ROCHA DE CARVALHO ALMEIDA  
Data: 22/06/2022 10:41:09-0300  
Verifique em <https://verificador.iti.br>

---

**Henrique Ravi Rocha de Carvalho**  
**Almeida**  
**(Membro Externo)**

**JUNHO/2022**

Dedico este trabalho, primeiramente à Deus, que em sua infinita misericórdia me capacitou para chegar até aqui. Aos meus pais, irmãs, avós e tios pelo apoio incondicional aos meus estudos, do início ao fim, ao meu esposo pelo companheirismo, paciência e dedicação diante das abdições necessárias.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus por minha vida e por ser uma presença real nela, por ter me concedido a graça de iniciar este curso de mestrado e ter me guiado até a sua conclusão.

Minha gratidão aos meus pais, Sheyla e Iran, pelo amor, cuidado e dedicação, obrigada por me apoiarem em minhas escolhas, caminhando junto comigo em busca de meus sonhos.

Agradeço às minhas irmãs, Izabelle e Ilana por estarem sempre comigo, compartilhando todos os momentos, alegrando e tornando meus dias mais leves.

Agradeço ao meu querido esposo Rafael por ser uma pessoa tão compreensiva e atenciosa, obrigada pelo amor, amizade, cumplicidade e força.

Aos meus avós, em especial, vovó Beta, meu maior e mais lindo exemplo de mulher aqui na terra. Obrigada pelas palavras doces e firmes, amor e dedicação a mim, desde o dia em que nasci e, tenho certeza, até sempre. Obrigada por acreditar no meu potencial.

Minha eterna gratidão a todos os meus tios, em especial, à tia Conceição e tia Silvia por me acolherem em suas casas e viabilizarem a continuação dos meus estudos. Obrigada por acreditarem em mim.

Agradeço aos meus alunos de reforço, Maria Clara, minha prima tão querida, e Anthonio por participarem também de todo esse processo que foi o mestrado em Meteorologia, e a seus pais por confiarem em meu trabalho, permitindo que eu contribuísse na educação de seus filhos.

Agradeço as minhas queridas colegas de mestrado Maria e Iara. Sem vocês não teria sido tão divertido e leve como foi. Obrigada por toda ajuda, conselhos e apoio durante o curso.

Agradeço ainda a todos os colaboradores da Universidade Federal de Alagoas, aos professores que passaram por mim durante esses dois anos, direta ou indiretamente, contribuindo na minha formação acadêmica, em especial a minha orientadora, Djane Fonseca da Silva, por todas as dicas e paciência na orientação, guinado com firmeza e carinho a árdua estrada da orientação, e aos professores que fizeram parte da banca examinadora, Maria Luciene, Henrique Ravi e Lincoln Eloi. Muito obrigada por fazerem parte dessa etapa importante em minha vida.

## RESUMO

O número de ocorrências de eventos extremos de precipitação vem aumentando ao longo dos últimos anos, dando-se, em alguns casos, com maior intensidade e duração, favorecendo assim desastres naturais como as secas severas. Esta pesquisa tem como objetivo analisar o nível dos principais reservatórios das quatro sub-bacias que compõem a Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, identificando os eventos pluviométricos, particularmente os de seca, e suas possíveis causas climáticas. O estudo foi realizado com dados de precipitação e cota obtidos através da Agência Nacional das Águas (ANA) para o período de 1968 a 2020. Os eventos extremos de seca foram classificados e caracterizados pelo índice de precipitação padronizada (SPI). O teste de Mann-Kendall foi utilizado com o objetivo de detectar tendências climáticas nas séries pluviométricas das quatro sub-regiões da BHSF e foram analisadas estatisticamente pelo teste de T-Student. Das quatro sub-regiões, três delas mostram tendência de diminuição na precipitação e na cota, enquanto apenas uma apresenta tendência de aumento, salientando as possíveis alterações nos níveis dos reservatórios das sub-regiões. A análise de Ondaletas foi empregada com a intenção de verificar ciclos de extremos pluviométricos e de suas causas através das escalas temporais observadas nas séries de precipitação das sub-regiões da BHSF. Os resultados mostram que todas as sub-regiões apresentam maiores ocorrências de secas que chuvas, no entanto, eventos de seca extrema mostram-se pouco frequentes, já os de seca leve foram mais recorrentes. Os anos caracterizados como quase normais, foram os de maior número nas quatro sub-regiões, no entanto, em todas elas, os episódios de seca leve tiveram percentuais expressivos. Na análise de Ondaletas, verificou-se que as escalas sazonal e interanual dominaram, associadas ao sinal persistente de El Niño Oscilação Sul (7 anos). Na análise de agrupamento foram identificadas regiões com comportamento semelhante. Em relação às médias anuais, formaram-se dois grandes grupos climáticos que se assemelham indiretamente entre si, e em relação às estações do ano, para o verão, formaram-se quatro grupos, para o outono e o inverno, cinco grupos e para a primavera, surgiram três grupos. O conhecimento dos grupos homogêneos na BHSF pode contribuir de maneira essencial para o gerenciamento dos recursos hídricos.

**Palavras-chave:** Seca, Mann-Kendall, Ondaletas, Tendências.

## ABSTRACT

The number of occurrences of extreme precipitation events has increased over the last few years, in some cases, with greater intensity and duration, thus favoring natural disasters such as severe droughts. This research aims to analyze the level of the main reservoirs of the four sub-basins that make up the São Francisco River Basin, identifying the pluviometric events, particularly those of drought, and their possible climatic causes. The study was carried out with precipitation and quota data obtained from the National Water Agency (ANA) for the period from 1968 to 2020. Extreme drought events were classified and characterized by the standardized precipitation index (SPI). The Mann-Kendall test was used to detect climatic trends in the rainfall series of the four sub-regions of the BHSF and were statistically analyzed by the T-Student test. Of the four sub-regions, three of them show a downward trend in precipitation and elevation, while only one shows an upward trend, highlighting the possible changes in the levels of the sub-regions' reservoirs. Wavelet analysis was used with the intention of verifying cycles of extreme rainfall and their causes through the temporal scales observed in the precipitation series of the BHSF sub-regions. The results show that all sub-regions have higher occurrences of droughts than rains, however, extreme drought events are infrequent, whereas mild drought events were more recurrent. The years characterized as almost normal were the ones with the highest number in the four sub-regions, however, in all of them, the episodes of mild drought had expressive percentages. In the Wavelet analysis, it was found that the seasonal and interannual scales dominated, associated with the persistent El Niño signal Southern Oscillation (7 years). In the cluster analysis, regions with similar behavior were identified. In relation to the annual averages, two large climatic groups were formed that are indirectly similar to each other, and in relation to the seasons of the year, for the summer, four groups were formed, for the autumn and winter, five groups and for the spring, three groups emerged. Knowledge of homogeneous groups in BHSF can make an essential contribution to the management of water resources.

Keywords: Drought, Mann-Kendall, Wavelets, Trends.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|                                                                                                                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1: Localização da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco.....                                                                                                      | 37 |
| Figura 2: Divisão da BHSF em quatro sub-regiões.....                                                                                                                       | 38 |
| Figura 3: Densidade demográfica na BHSF.....                                                                                                                               | 39 |
| Figura 4: Localização dos postos pluviométricos na BHSF.....                                                                                                               | 40 |
| Figura 5: Localização dos postos fluviométricos na BHSF.....                                                                                                               | 41 |
| Figura 6: Média climatológica para o ASF de 1968 a 2020.....                                                                                                               | 48 |
| Figura 7: Média climatológica para o MSF de 1968 a 2020.....                                                                                                               | 49 |
| Figura 8: Média climatológica para o SMSF de 1968 a 2020.....                                                                                                              | 49 |
| Figura 9: Média climatológica para o BSF de 1968 a 2020.....                                                                                                               | 50 |
| Figura 10: Precipitação Anual para o ASF de 1968 a 2020.....                                                                                                               | 51 |
| Figura 11: Cota Média Anual para o ASF de 1968 a 2020.....                                                                                                                 | 51 |
| Figura 12: Precipitação Anual para o MSF de 1968 a 2020.....                                                                                                               | 52 |
| Figura 13: Cota Média Anual para o MSF de 1968 a 2020.....                                                                                                                 | 52 |
| Figura 14: Precipitação Anual para o SMSF de 1968 a 2020.....                                                                                                              | 53 |
| Figura 15: Cota Média Anual para o SMSF de 1972 a 2020.....                                                                                                                | 53 |
| Figura 16: Precipitação Anual para o BSF de 1968 a 2020.....                                                                                                               | 54 |
| Figura 17: Cota Média Anual para o BSF de 1968 a 2020.....                                                                                                                 | 54 |
| Figura 18: Tipos de eventos de acordo com o SPI para ASF.....                                                                                                              | 55 |
| Figura 19: Tipos de eventos de acordo com o SPI para MSF.....                                                                                                              | 56 |
| Figura 20: Tipos de eventos de acordo com o SPI para SMSF.....                                                                                                             | 56 |
| Figura 21: Tipos de eventos de acordo com o SPI para BSF.....                                                                                                              | 57 |
| Figura 22a): Série temporal do SPI para o ASF.....                                                                                                                         | 60 |
| Figura 22b): Espectro de potência de ondaleta (EPO) para SPI do ASF. A curva em forma de U representa o cone de influência, sob a qual o efeito de borda é importante..... | 60 |

|                                                                                                                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 22c): Espectro de potência global (EPG), com o contorno tracejado indicando que o EPG é significativo ao nível de confiança de 95%.....                              | 60 |
| Figura 23a): Série temporal do SPI para o MSF.....                                                                                                                          | 61 |
| Figura 23b): Espectro de potência de ondaleta (EPO) para SPI do MSF. A curva em forma de U representa o cone de influência, sob a qual o efeito de borda é importante.....  | 62 |
| Figura 23c): Espectro de potência global (EPG), com o contorno tracejado indicando que o EPG é significativo ao nível de confiança de 95%.....                              | 62 |
| Figura 24a): Série temporal do SPI para o SMSF.....                                                                                                                         | 63 |
| Figura 24b): Espectro de potência de ondaleta (EPO) para SPI do SMSF. A curva em forma de U representa o cone de influência, sob a qual o efeito de borda é importante..... | 63 |
| Figura 24c): Espectro de potência global (EPG), com o contorno tracejado indicando que o EPG é significativo ao nível de confiança de 95%.....                              | 63 |
| Figura 25a): Série temporal do SPI para o BSF.....                                                                                                                          | 64 |
| Figura 25b): Espectro de potência de ondaleta (EPO) para SPI do BSF. A curva em forma de U representa o cone de influência, sob a qual o efeito de borda é importante.....  | 64 |
| Figura 25c): Espectro de potência global (EPG), com o contorno tracejado indicando que o EPG é significativo ao nível de confiança de 95%.....                              | 64 |
| Figura 26: Dendrograma das médias anuais.....                                                                                                                               | 66 |
| Figura 27: Mapa de distribuição espacial dos grupos com médias anuais semelhantes.....                                                                                      | 68 |
| Figura 28: Dendrograma para o verão.....                                                                                                                                    | 69 |
| Figura 29: Mapa de distribuição espacial dos grupos semelhantes em relação ao verão.....                                                                                    | 70 |
| Figura 30: Dendrograma para o outono.....                                                                                                                                   | 71 |
| Figura 31: Mapa de distribuição espacial dos grupos semelhantes em relação ao outono.....                                                                                   | 72 |
| Figura 32: Dendrograma para o inverno.....                                                                                                                                  | 73 |
| Figura 33: Mapa de distribuição espacial dos grupos semelhantes em relação ao inverno.....                                                                                  | 74 |
| Figura 34: Dendrograma para a primavera.....                                                                                                                                | 75 |
| Figura 35: Mapa de distribuição espacial dos grupos semelhantes em relação a primavera.....                                                                                 | 76 |
| Figura 36: Distribuição espacial da média anual do SPI na BHSF.....                                                                                                         | 77 |
| Figura 37: Distribuição espacial do SPI na BHSF no verão.....                                                                                                               | 78 |
| Figura 38: Distribuição espacial do SPI na BHSF no outono.....                                                                                                              | 79 |

|                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 39: Distribuição espacial do SPI na BHSF na primavera..... | 80 |
| Figura 40: Distribuição espacial do SPI na BHSF no inverno.....   | 81 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1: Características da Região Hidrográfica do São Francisco.....                                                                        | 38 |
| Tabela 2: Postos pluviométricos das sub-regiões da BHS.....                                                                                   | 40 |
| Tabela 3: Postos fluviométricos das sub-regiões da BHSF.....                                                                                  | 41 |
| Tabela 4: Classificação do Índice de Precipitação Padronizada (SPI) e categorias.....                                                         | 43 |
| Tabela 5: Postos pluviométricos acrescentados por sub-bacia.....                                                                              | 46 |
| Tabela 6: Tendência Anual e da Série para as quatro sub-regiões da BHSF.....                                                                  | 58 |
| Tabela 7: Status da tendência e Teste T-Student, o qual mostra as sub-regiões que apresentaram significância estatística ao nível de 95%..... | 58 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|       |                                                   |
|-------|---------------------------------------------------|
| AB    | Alta da Bolívia                                   |
| ANA   | Agência Nacional de Águas                         |
| AO    | Análise de Ondaletas                              |
| ASF   | Alto São Francisco                                |
| BHSF  | Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco           |
| BSF   | Baixo São Francisco                               |
| CCM   | Complexo Convectivo de Mesoescala                 |
| CBHSF | Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco |
| CHESF | Companhia Hidrelétrica do São Francisco           |
| CPTEC | Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos  |
| DA    | Dipolo do Atlântico                               |
| DOL   | Distúrbios Ondulatórios de Leste                  |
| ENOS  | El Niño Oscilação Sul                             |
| EPG   | Espectro de potência global                       |
| EPO   | Espectro de potência de ondaleta                  |
| IAC   | Índice de Anomalia de Chuva                       |
| ICAT  | Instituto de Ciências Atmosféricas                |
| INMET | Instituto Nacional de Meteorologia                |
| IPCC  | Intergovernmental Panel on Climate Change         |
| LI    | Linha de Instabilidade                            |
| MSF   | Médio São Francisco                               |
| MMA   | Ministério do Meio Ambiente                       |
| MW    | Megawatt                                          |
| NASA  | National Aeronautics and Space Administration     |
| NEB   | Nordeste Brasileiro                               |

|        |                                                                      |
|--------|----------------------------------------------------------------------|
| NOAA   | National Oceanic and Atmospheric Administration                      |
| ODP    | Oscilação Decadal do Pacífico                                        |
| OIP    | Oscilação Interdecadal do Pacífico                                   |
| OL     | Ondas de Leste                                                       |
| OMA    | Oscilação Multidecadal do Atlântico                                  |
| PPGMET | Programa de Pós-Graduação em Meteorologia                            |
| PRSF   | Programa de Revitalização da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco |
| RH     | Região Hidrográfica                                                  |
| SCM    | Sistemas Convectivos de Mesoescala                                   |
| SNIRH  | Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos              |
| SMSF   | Submédio São Francisco                                               |
| SPI    | Standardized Precipitation Index                                     |
| SPSS   | Statistical Package for the Social Sciences                          |
| TSM    | Temperatura da Superfície do Mar                                     |
| UFAL   | Universidade Federal de Alagoas                                      |
| VCAN   | Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis                                  |
| VCMN   | Vórtice Ciclônico em Médios Níveis                                   |
| ZCAS   | Zona de Convergência do Atlântico Sul                                |
| ZCIT   | Zona de Convergência Intertropical                                   |

## SUMÁRIO

|                                                                                                                                     |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO .....</b>                                                                                                          | <b>14</b> |
| <b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>                                                                                               | <b>16</b> |
| <b>2.1 A Bacia hidrográfica do rio São Francisco .....</b>                                                                          | <b>16</b> |
| <b>2.2 Eventos Extremos .....</b>                                                                                                   | <b>20</b> |
| <b>2.3 Eventos climáticos e fenômenos meteorológicos na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco ...</b>                             | <b>22</b> |
| 2.3.1 Zona de Convergência do Atlântico Sul .....                                                                                   | 23        |
| 2.3.2 Ondas de Leste .....                                                                                                          | 24        |
| 2.3.3 Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VCAN) e Vórtices Ciclônicos de Médios Níveis (VCMN) .....                                  | 25        |
| 2.3.4 Complexo Convectivo de Mesoescala (CCM) e Linhas de Instabilidade (LI) .....                                                  | 26        |
| 2.3.5 Sistemas Frontais .....                                                                                                       | 27        |
| 2.3.6 ENOS e Variabilidade do Oceano Pacífico .....                                                                                 | 28        |
| 2.3.7 Dipolo do Atlântico e Variabilidade do Oceano Atlântico .....                                                                 | 29        |
| 2.3.8 Escalas temporais .....                                                                                                       | 30        |
| <b>2.4 Impactos da variabilidade climática sobre a disponibilidade hídrica de reservatórios e sobre as atividades humanas .....</b> | <b>35</b> |
| <b>3. METODOLOGIA .....</b>                                                                                                         | <b>37</b> |
| <b>3.1 Área de estudo .....</b>                                                                                                     | <b>37</b> |
| <b>3.2 Dados .....</b>                                                                                                              | <b>39</b> |
| <b>3.3 Uso de SPI .....</b>                                                                                                         | <b>42</b> |
| <b>3.4 Tendência de precipitação e de níveis de reservatórios .....</b>                                                             | <b>44</b> |
| <b>3.5 Análise de Agrupamento .....</b>                                                                                             | <b>45</b> |
| <b>3.6 Análise de Ondaleta .....</b>                                                                                                | <b>47</b> |
| <b>4. RESULTADOS .....</b>                                                                                                          | <b>48</b> |
| 4.1 Análise Climática .....                                                                                                         | 48        |
| 4.3 Tipos de eventos de acordo com o SPI .....                                                                                      | 55        |
| 4.4 Tendências climáticas em precipitação e cotas .....                                                                             | 58        |
| 4.5 Análise de Ondaletas .....                                                                                                      | 59        |
| 4.6 Análise de Agrupamento .....                                                                                                    | 65        |
| 4.7 Distribuição Espacial do Índice de Precipitação Padronizada (SPI) .....                                                         | 76        |
| <b>5. CONCLUSÕES .....</b>                                                                                                          | <b>82</b> |
| <b>5. REFERÊNCIAS .....</b>                                                                                                         | <b>84</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

Um dos fenômenos ambientais que afeta diversas regiões do planeta e provoca impactos nos âmbitos social, econômico e ambiental é a seca. Esse fenômeno é considerado o pior desastre natural em número de pessoas afetadas (RAJSEKHAR, 2015), além dos prejuízos financeiros que provoca. Por isso é importante estudar os fatores que interferem nas questões ambientais. Um deles é a precipitação, elemento importante tanto do ciclo hidrológico como também na vida dos seres humanos, interferindo diretamente no planejamento de suas atividades e desenvolvimento local.

O conhecimento da quantidade de chuva que cai em uma região é fundamental para o planejamento estratégico dos recursos hídricos e de todas as atividades que fazem uso desses recursos. Essas informações são essenciais para estudos de balanço hídrico, controle de inundações, irrigação de culturas, modelagem hidrológica, monitoramento de seca e de geada, além da caracterização climatológica (LOUZADA, 2016). Por isso, seguindo essa linha, estudos que buscam compreender a dinâmica das secas em reservatórios e como isso afeta diretamente as ações humanas são importantes.

O histórico climático da Terra mostra que o clima tem oscilado entre os extremos quentes e frios ao longo dos períodos, interferindo também nos regimes de chuva pelo globo. De acordo com Guido (2019), a variabilidade natural do clima está relacionada à variação nos parâmetros climáticos que não são causados por forças humanas, como exemplo, variações no Sol, erupções vulcânicas e mudanças na órbita da Terra, os quais exercem um controle externo sobre a variabilidade climática. A variabilidade natural também é influenciada por fenômenos climáticos naturais do próprio sistema climático global, como por exemplo, o fenômeno El Niño Oscilação Sul (ENOS) e Oscilação Decadal do Pacífico (ODP).

A Bacia hidrográfica do rio São Francisco (BHSF) tem significativa importância para o país, não só pelo volume de água que transporta em uma região semiárida, mas, também, pelo potencial hídrico apto para aproveitamento, além de sua contribuição histórica e econômica. Por meio de sistema de irrigação, é possível realizar várias atividades de agropecuária, desde a criação de gado até o cultivo de frutas para exportação e, também, para subsistência (ANA, 2015).

O comportamento climático dessa Bacia é variável devido sua extensão e localização geográfica. Mais da metade de sua área, localiza-se no Nordeste, percorrendo boa parte do semiárido nordestino, estendendo-se por regiões de clima semiárido, árido e úmido. Segundo Santos et al. (2011), seu regime pluviométrico pode ser influenciado por vários sistemas

atmosféricos, como a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e Vórtices Ciclônicos de Ar Superior (VCAS), além da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), entre outros.

De acordo com Assis (2016) a alta variabilidade pluviométrica da Bacia hidrográfica também se relaciona a alguns fatores, como a flutuação nos valores de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) dos Oceanos Pacífico Tropical Equatorial e do Atlântico tropical, ou seja, relaciona-se ao ENOS, ODP, Dipolo do Atlântico (DA) e Oscilação Multidecadal do Atlântico (OMA).

O diagnóstico das secas é um trabalho importante, em especial em uma Bacia que abrange tantas regiões como a que está sendo analisada. Esse tipo de estudo pode fornecer informações valiosas para avaliar a intensidade e seus possíveis impactos, estimulando o poder público a investir no planejamento e mitigação desses eventos.

Um dos índices de categorização de eventos extremos bastante utilizado é o Índice de Precipitação Padronizado (SPI), desenvolvido por McKee, Doesken e Kleist (1993). Segundo Hayes (1999), o SPI tem como objetivo classificar eventos extremos de precipitação, sendo capaz de quantificar a escassez ou o excesso de precipitação em várias escalas de tempo, podendo assim, monitorar secas. Adicionalmente, as causas climáticas dos eventos extremos podem ser averiguadas utilizando a Análise de Ondaletas (AO), que de acordo com Da Silva (2009) é uma técnica apropriada para determinar as escalas de variabilidade dominantes em uma série temporal, bem como suas variações temporais.

Por tanto, o objetivo deste trabalho é analisar o nível dos principais reservatórios das quatro sub-bacias que compõem a Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, no período de 1968 a 2020, identificando os eventos extremos, particularmente os de seca, e suas possíveis causas climáticas. Como objetivos específicos deste estudo, destacam-se identificar e classificar os eventos de chuva/seca na BHSF, detectar tendências de precipitação e nível nas sub-regiões, identificar eventos extremos de seca, analisar as escalas temporais nas séries de precipitação, verificar as regiões com regime de precipitação semelhante.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

O Brasil é o maior país da América do Sul, sendo o quinto maior do mundo em área territorial e em população, com mais de 211 milhões de habitantes (IBGE, 2020). Além de ser um país de grandes dimensões, apresenta também, grande diversidade geoclimática, socioeconômica e de distribuição populacional heterogênea. De acordo com Marengo (2018), as secas ocorridas nos últimos anos associadas ao crescente processo de urbanização, às mudanças climáticas e à variabilidade natural do clima do planeta, podem piorar a oferta e a demanda de água nas diferentes regiões do país.

O Brasil tem um sistema denso e complexo de rios, um dos mais extensos do mundo, com oito grandes Bacias hidrográficas, que drenam para o Atlântico. Os rios mais importantes são o Amazonas, Paraná, Negro, São Francisco, Xingu, Madeira e Tapajós (BRASIL, 2020). Desses citados, o rio São Francisco, principal curso d'água da Bacia do São Francisco, destaca-se por sua importância econômica e social para as regiões em que passa, nas quais predominam condições naturais adversas (MMA, 2006).

### **2.1 A Bacia hidrográfica do rio São Francisco**

A Bacia do São Francisco é formada por diversas sub-bacias que deságuam no rio São Francisco, e por sua vez, no oceano Atlântico (BROCCA et al., 2013). Ocupa uma área correspondente a 7,5 % do território brasileiro (ANA, 2020), aproximadamente 641.000 km<sup>2</sup> de área de drenagem, passando por sete estados brasileiros: Alagoas, Sergipe, Pernambuco, Bahia, Minas Gerais, Distrito Federal e Goiás.

Com grande diversidade ambiental, a Bacia do São Francisco apresenta fragmentos de diferentes biomas como de floresta atlântica, cerrado e caatinga. O primeiro predomina em regiões úmidas com formação das matas ciliares. O segundo abrange, praticamente, metade da área da Bacia, predominante nas regiões de clima úmido e subúmido com solos de baixa fertilidade. O terceiro expressa dominância em áreas de clima árido e semiárido, onde as condições climáticas são mais severas. (A BACIA, 2016)

Segundo dados do Instituto Nacional de Meteorologia, a precipitação média anual na região hidrográfica do São Francisco é de aproximadamente 1.003 mm, muito abaixo da média nacional, que é de 1.761 mm e a disponibilidade hídrica superficial é de 1.886 m<sup>3</sup>/s, o que corresponde a 2,07 % da disponibilidade superficial do país. Ainda segundo o Instituto, a temperatura média anual varia entre 18 °C e 27 °C com baixo índice de nebulosidade e grande incidência de radiação

solar. Já de acordo com os dados da Agência Nacional de Águas (ANA, 2017), a vazão média é de 2.846 m<sup>3</sup>/s, correspondendo a 1,58 % da vazão média nacional, e a demanda total é 278 m<sup>3</sup>/s.

Por ser um país de dimensões continentais, o Brasil apresenta um regime de chuvas bastante heterogêneo, variando de região para região. Em alguns locais, chove mais e uma maior disponibilidade natural de água acaba existindo; em outros, as secas são mais frequentes e a escassez hídrica torna-se um problema a ser enfrentado, como em uma grande parte da Bacia do São Francisco que está inserida no polígono da seca (SOARES, 2013), área conhecida como sujeita a repetidas crises de falta de chuvas.

Não obstante, conforme expõe o Comitê da Bacia do Rio São Francisco (2016), uma de suas principais características é a presença de diversos tipos de usos dos recursos hídricos, por isso sua importância nos âmbitos ecológico, econômico e social para região. A irrigação, por exemplo, com a qual é possível realizar várias atividades de agropecuária, desde a criação de gado até o cultivo de frutas para exportação e, também, para subsistência, destaca-se. Além dela, Da Silva et al. (2011) evidenciaram também a produção de energia elétrica, a navegação, o abastecimento urbano, e o uso industrial.

Por causa disso, a construção de reservatórios foi sendo realizada pelo homem há bastante tempo, com o barramento dos rios, cuja principal função era o abastecimento de água para a região, amenizando problemas de seca, aumentando, assim, a segurança hídrica e alimentar da população (FERREIRA, 2019). Entretanto, os eventos climáticos extremos podem afetar o abastecimento de água nos reservatórios

Com relação aos usos dos recursos hídricos, a sala de situação da ANA (2020), disponível na plataforma da agência, afirma que:

Há predomínio de retirada para irrigação (213,7 m<sup>3</sup>/s), que representa 77% do total de demandas na Região. A irrigação é seguida pela demanda urbana, com 31,3 m<sup>3</sup>/s (11%), concentrada principalmente na Região Metropolitana de Belo Horizonte, e industrial com 19,8 m<sup>3</sup>/s (7%). A demanda animal da região é de 10,2 m<sup>3</sup>/s (4%) e a rural, de 3,7 m<sup>3</sup>/s (1%). A Região do São Francisco tem importante papel na geração de energia elétrica, com potencial instalado, em 2013, de 10.708 MW (12% do total do País). Destacam-se as usinas de Xingó (3.162 MW), Paulo Afonso IV (2.462 MW), Luiz Gonzaga (1.479 MW) e Sobradinho (1.050 MW). O aproveitamento hidrelétrico do Rio São Francisco representa a base de suprimento de energia do Nordeste.

Em razão de sua grande extensão, a Bacia do Rio São Francisco é dividida em quatro regiões fisiográficas: Alto São Francisco (ASF), Médio São Francisco (MSF), Submédio São Francisco (SMSF) e Baixo São Francisco (BSF). O que motivou sua divisão foi a grande dimensão

territorial. Essa divisão se fez de acordo com o sentido do curso do rio e com a variação de altitudes (CBHSF, 2016).

Assim, sua parte inicial, tendo como referência a área montanhosa onde o rio nasce, estende-se da Serra da Canastra até Pirapora, ambos no estado de Minas Gerais, ganhou a denominação de Alto São Francisco. Da Silva et al. (2011) afirmam que essa região apresenta topografia ligeiramente acidentada, com serras e terrenos ondulados. Sua quadra chuvosa costuma ocorrer de novembro a fevereiro, caracterizando-se o clima tropical úmido, temperado e de altitude. A precipitação média fica entre 1.100 mm e 2.000 mm, as vezes sendo responsável pela formação das enchentes no rio.

A região do ASF, onde se inicia o curso do rio São Francisco, apresenta, segundo Euclydes (2001), vegetação nativa constituída substancialmente por Cerrado, vegetação característica de clima semiúmido. É nessa região que fica situada a usina hidrelétrica de Três Marias que tem como principal reservatório um de mesmo nome, reservatório de Três Marias. Este reservatório tem significativa importância para toda a Bacia, pois, além de ser utilizado para produção de energia hidrelétrica, ainda atua no controle de enchentes e da vazão do rio, irrigação e melhoria das condições de navegabilidade no São Francisco (EUCLYDES, 2001; SANTOS, 2008).

A região do MSF é a maior das quatro regiões, com 63 % da área total da Bacia (LONDOÑO, 2019), estendendo-se da confluência com o rio Jeiquitaí até a barragem de Sobradinho. Possui, predominantemente, vegetação de Cerrado, Caatinga e Zonas de Transição. Os recursos hídricos da região oeste da Bahia se constituem na mais importante fonte de alimentação de água do MSF, sendo responsável por cerca de 75 % do aporte hídrico do referido rio, no Estado da Bahia (MMA, 2006).

O reservatório de Sobradinho é o que mais se destaca no MSF, além da função de geração de energia elétrica é a principal fonte de regularização dos recursos hídricos da região, que segundo a CHESF (Companhia Hidroelétrica do São Francisco) tem o objetivo de acumular as águas provenientes do excedente na região alta (ASF). Ainda de acordo com dados da CHESF, ele tem cerca de 320 km de extensão e uma capacidade de armazenamento de 34,1 bilhões de metros cúbicos constituindo-se no maior lago artificial do mundo.

Os reservatórios de Três Marias e Sobradinho são os dois reservatórios da BHSF de maior capacidade de acumulação e com regularização de vazão plurianual (ciclos de enchimento e esvaziamento maiores que um ano), o que permite mais facilmente o atendimento às necessidades do abastecimento urbano ou rural, o aproveitamento hidroelétrico, a atenuação de cheias ou

controle de estiagens, o controle de sedimentos, entre outros (LANNA, 1993). Os outros reservatórios da Bacia são de menor capacidade.

A região SMSF contém 17 % da área da Bacia e estende-se da barragem de Sobradinho até a barragem de Xingó, abrangendo o oeste do estado de Pernambuco e norte do estado da Bahia, dessa forma, está localizado na porção semiárida do Nordeste brasileiro. De acordo com Assis (2018), destacam-se nesse trecho as represas de Paulo Afonso I, II, III e IV, Itaparica e Moxotó.

Do ponto de vista climático, essa área é caracterizada pela grande irregularidade das precipitações (LONDOÑO, 2019) e apresenta como principal período chuvoso os meses de janeiro a abril, com os totais pluviométricos anuais oscilando entre 300 e 1200 mm, em média. Nessa região, o clima é tropical tendendo a seco, isso se dá, segundo Assis (2016), em função da irregularidade da ação das massas de ar Tropical e Equatorial.

Finalmente, a região do BSF contém 4% da área total, estendendo-se de Paulo Afonso (BA) até a sua foz, entre Sergipe e Alagoas. A vegetação predominante é a caatinga juntamente com mata Atlântica, sendo o uso do solo marcado pela pecuária tradicional e pela agricultura de subsistência. Predomina o clima tropical quente e úmido, com precipitação média anual de aproximadamente 1200 mm e período chuvoso de março a agosto (MARTINS et al., 2011). É nessa região hidrográfica que está localizado o reservatório de Xingó, último reservatório construído pela CHESF no rio São Francisco, o qual apresenta uma superfície de 60 km<sup>2</sup> e uma capacidade de armazenamento da ordem de 3,8 km<sup>3</sup> (ANA, 2020).

No percurso da Bacia, ocorrem episódios climáticos distintos, como enchentes e secas, que comprometem a disponibilidade de água nos reservatórios (CASTRO, 2019). Normalmente, as cheias são características do ASF, e as secas ocorrem geralmente no MSF e no SMSF (MMA, 2006). Ainda de acordo com Castro (2019), o intervalo de dezembro a março é o mais crítico em relação à ocorrência de enchentes e, de acordo com o Programa de Revitalização da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (PRSF, 2019), entre as principais cheias ocorridas, estão as dos anos de 1919, 1925, 1943, 1946, 1949, 1979, 1983, 1992 e 2004.

Santos et al. (2013) mostraram que em situações de chuvas intensas a probabilidade de formação de cheias e inundações é bem maior nas regiões semiáridas da BHSF por causa da forte pressão antrópica em torno das represas ali alocadas, em consequência da disponibilidade de água e considera que essa é uma das causas mais prováveis do aumento na vulnerabilidade aos eventos extremos de chuva.

Já em relação as secas na Bacia, esse fenômeno ocorre em toda sua extensão em épocas e regiões diferentes, devido ao atraso do início da estação chuvosa ou a longos períodos de estiagem, muitas vezes superiores a 15 dias, esse último comum no ASF e MSF (MMA, 2006), provocando perdas na produção agrícola, aumentando o êxodo rural e agravando, com isso, o crescimento urbano.

Nou (1994) concluiu que as secas que ocorrem no MSF, em particular na região árida de Sobradinho, correspondem a um evento climático que se repete frequentemente. Em consonância com Nou (1994), de acordo com a Embrapa (2020), estima-se que a cada 100 anos há entre 18 e 20 anos de secas intensas. Segundos dados históricos da ANA (2020), das dez piores secas registradas, cinco ocorreram nos últimos 10 anos, entre 2014 a 2018.

A ANA monitora e analisa a evolução das chuvas no país. Todas as informações são compartilhadas através de boletins, dando embasamento para as tomadas de decisão dos setores responsáveis pela gestão de eventos hidrológicos críticos. Dessa forma, a ANA participa do planejamento e promove ações destinadas à prevenção e redução dos efeitos das secas e inundações.

## **2.2 Eventos Extremos**

Valores atípicos de uma condição climática média notados ao longo do tempo são chamados de eventos climáticos extremos, que incluem, por exemplo, períodos de alta temperatura, chuvas torrenciais e secas (ROSENZWEIG, 2001).

Os eventos climáticos extremos, resultantes das relações oceano-atmosfera, vêm se manifestando cada vez mais intensos ao longo dos anos, atingindo indistintamente todas as populações do globo (MARENGO, 2006). De acordo com Ferreira (2019), isso se deve, dentre outros fatores, ao aumento do processo de aquecimento global.

Eventos extremos como secas, enchentes, ondas de calor e de frio, furações e tempestades alteram o cotidiano das pessoas. Marengo (2006) diz que esses eventos afetam diferentes partes do planeta e produzem enormes perdas econômicas e de vidas humanas. São várias as consequências para as regiões de ocorrência, afetando o consumo humano, animal e industrial, agricultura e a geração de energia, alterações na biodiversidade, dentre tantas outras (SILVA DIAS, 2014).

Marengo (2006) listou alguns eventos de extremos climáticos recentes de grande impacto no mundo, a saber:

“A onda de calor na Europa em 2003, os furacões Katrina, Wilma e Rita no Atlântico Norte em 2005, o inverno extremo da Europa e Ásia em 2006. Também se pode mencionar, no Brasil, o furacão Catarina em março 2004, a recente seca da Amazônia em 2005 e as secas já observadas no Sul do Brasil em 2004, 2005 e 2006”.

Alterações no clima que mudam o regime de chuvas têm potencial para causar o aumento da ocorrência de eventos hidrológicos extremos, como inundações e longos períodos de seca (ANA, 2020). Esses eventos influenciam a oferta de água, ameaçando o fornecimento de recursos hídricos. São esses os principais eventos que ocorrem na Bacia do São Francisco, por isso, o conhecimento da frequência e durabilidade desses eventos é importante para tomadas de decisão e elaboração de medidas preventivas. Melo (2017) diz que secas e estiagens intensas não podem ser evitadas, mas sim, mitigadas, devido à variabilidade natural climática.

O que caracteriza o extremo climático é a constância de um padrão climático global por algumas semanas (SILVA DIAS, 2014). Segundo a autora, ao se reduzir a variabilidade, uma situação é criada, a qual vai se mantendo e intensificando até caracterizar o extremo, e ainda completa dizendo que no caso da seca, a percepção de que algo está acontecendo é mais difícil já que ela se estabelece vagarosamente e vai impactando os recursos hídricos de forma gradual.

Sun (2016) mostrou que a seca, como evento hidrológico extremo, tem sério impacto na humanidade. Esses impactos incluem perda de vidas, contratempos em safras e escassez de alimentos, problemas de saúde e migração acentuada. As consequências na sociedade e no meio ambiente são de longo alcance.

Nos Estados Unidos da América (EUA) existem problemas relacionados com secas cada vez mais intensas e prolongadas, como ocorre na barragem Hoover, no rio Colorado, Arizona e que possui um importante reservatório para abastecimento e geração de energia (DA SILVEIRA et al., 2017), no qual a disponibilidade hídrica fica comprometida por longas e severas secas.

De acordo com Cunha et al. (2019), no intervalo de 2011 a 2017, as secas afetaram grande parte do Brasil, e o ano hidrológico de 2011/2012 apresentou a condição de seca mais severa. Outros estudos mostraram que os eventos de seca registrados no Nordeste do Brasil (NEB), naquele mesmo período estudado por Cunha et al. (2019), foram considerados mais intensos em termos de duração, gravidade e recorrência (ALVALA et al., 2019; MARENGO, 2013).

Marengo (2015) relata que o Sudeste do Brasil já viveu secas intensas, como as que ocorreram em 1953, 1971 e 2001 e que a pequena quantidade de chuva registrada durante os verões de 2013-2014 e 2014-2015 representou uma das maiores secas da história da região do Sistema Cantareira, entre São Paulo e Minas Gerais, afetando a disponibilidade hídrica dos reservatórios.

Já Oliveira (2015) analisou o comportamento da Bacia hidrográfica do rio Solimões em 2005 e 2010, nos quais ocorreram as maiores secas do século na Amazônia. “Os resultados obtidos mostraram que a pluviometria na Bacia do rio Solimões foi drasticamente reduzida na região sudoeste em 2005. Já em 2010 toda a porção oeste e sul da Bacia foram afetadas durante a seca” (OLIVEIRA, 2015).

O NEB é considerado uma região problemática devido aos períodos de longa estiagem, com escassez de água por anos, às vezes, mas não só o NEB enfrenta esse tipo de problema. Entre 2013 e 2015, a região Sudeste do Brasil passou por um período de estiagem muito intenso, em que foram registrados volumes de chuva muito abaixo das médias históricas para a estação chuvosa, entre outubro e março. No sul de Minas Gerais, por exemplo, o reservatório de Furnas atingiu menos de 20% da sua capacidade, comprometendo a geração de energia hidrelétrica do país (SILVA, 2018).

O rio São Francisco é um rio perene, por isso ele não seca, independentemente do período de estiagem, mas a população que depende dessa fonte de recursos hídricos sofre bastante nesses períodos. As secas ocorrem geralmente nas regiões do Médio e Submédio São Francisco, colocando em destaque um problema latente, a falta de uma organização socioeconômica (MMA, 2006). Essas condições hostis continuam a demandar estudos para que suas causas sejam identificadas e facilitar a implementação de ações, contribuindo para entender esse fenômeno e suas consequências.

Carmo Sobral et. al. (2018) comenta que um dos grandes desafios para a gestão das águas da BHSF, encontra-se na gestão de reservatórios no semiárido, região extremamente seca e que, segundo a autora, vem sofrendo com a redução do volume de água nos últimos anos, evidenciando a ocorrência de eventos extremos de secas. Gondim et al. (2017) também trataram da seca nessa região, relatando que desde 2012, a Bacia vem apresentando valores de precipitação abaixo da média histórica. Em seu trabalho é mostrada a situação crítica de alguns dos reservatórios presentes no rio São Francisco, a saber, Três Marias, Sobradinho e Itaparica. (GONDIM et al., 2017).

### **2.3 Eventos climáticos e fenômenos meteorológicos na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco**

O comportamento climático da BHSF é bem variável por causa de seu tamanho e localização geográfica (ASSIS, 2016), na qual ocorre intensa influência de diversos fenômenos atmosféricos que interferem no regime de precipitação na Bacia (SILVA, 2004). Os eventos

climáticos e fenômenos meteorológicos que mais causam interferências nas características climatológicas serão mencionados.

### 2.3.1 Zona de Convergência do Atlântico Sul

A Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) é, de acordo com Quadro (1994), uma cobertura de nuvens convectivas orientada no sentido noroeste/sudeste que permanece por pelo menos quatro dias consecutivos e, segundo Rosso (2018), estende-se do sul da Amazônia ao sudoeste do Oceano Atlântico, sendo sua atividade mais frequente nos meses de outubro a março. Esse fenômeno atmosférico tem papel importante no período chuvoso das regiões em que atua, principalmente, sudeste e centro-oeste do Brasil.

Característica das regiões tropicais, é o principal sistema meteorológico típico de verão que ocorre na América do Sul, sendo de grande interesse porque regula a estação chuvosa nas regiões mais populosas do Brasil, como o sul e oeste do Nordeste, sul da Amazônia e sudeste do Brasil (ROSSO, 2018). Esse fato foi ratificado por Quadro et al. (2019), onde mostraram que o regime pluviométrico associado a ZCAS é responsável por 50% da precipitação anual sobre a América do Sul que ocorre nos meses de dezembro a fevereiro e cerca de 90% durante os meses de outubro a abril.

Embora as características mais marcantes da ZCAS consigam ser observadas, principalmente, em todos os verões, importantes alterações ocorrem na organização espacial, na intensidade das chuvas e na circulação (CAVALCANTI et al., 2009). Essas variações são, grande parte das vezes, responsáveis pelo acontecimento de eventos severos e em ausência de chuvas, podem ocorrer grandes períodos de seca ou má distribuição das mesmas sobre grandes regiões do território brasileiro (CAVALCANTI et al., 2009).

Com relação à variabilidade temporal da ZCAS, ela é bastante ativa de novembro a abril, podendo aparecer, segundo Lopes (2014), na primavera e verão, algumas vezes no outono, mas nunca no inverno. Segundo Da Silva (2008), a ZCAS pode sofrer influências tanto de fatores remotos quanto locais, e de acordo com CPTEC (2020), estudos observacionais e numéricos indicam que os mecanismos que originam e mantêm esse sistema ainda não estão totalmente definidos.

Na extensão da BHSF, para Da Silva (2005), a ZCAS atua na produção de chuva de novembro a março nas sub-bacias do Alto São Francisco (ASF) e Médio São Francisco (MSF). Da Silva (2008) chegou à conclusão que a posição média da ZCAS é em torno de 20° S e entre as

longitudes de 42,5° W e 45° W, e é fundamental para produção de chuva sobre a Bacia do rio São Francisco.

### 2.3.2 Ondas de Leste

Distúrbios ondulatórios de leste (DOL) ou ondas de leste (OL) são sistemas atmosféricos verificados na região tropical, prioritariamente sobre áreas dos Oceanos Atlântico e Pacífico (NEVES et al., 2016). Esses sistemas são responsáveis por trazer grande quantidade de umidade, instabilidade tropical e movimentos ascendentes causando o desenvolvimento de nebulosidade, sendo responsável por modular o regime de chuvas nas regiões influenciadas (SILVA, 2018).

Um exemplo dessas perturbações tropicais são as ondas de leste africanas. Para Cavalcanti et al. (2009) as OL mais conhecidas e estudadas são as OL africanas, sistemas que se propagam desde o oeste da África até o Atlântico Tropical, com atividade máxima ocorrendo no inverno austral.

Segundo Lacerda (2018), as áreas mais susceptíveis para ocorrer interferência das OL no NEB são os estados de Alagoas, Sergipe, Pernambuco, Paraíba, Rio Grande do Norte e Bahia. Esses distúrbios podem ocorrer em todas as estações, mas para Diedhiou et al. (2010), parecem mais frequentes durante março-abril-maio (MAM) e junho-julho-agosto (JJA), onde ocorrem mais variações no vento meridional, havendo mais atividade das OL neste período, coincidindo, justamente, com a estação chuvosa sobre o leste do NEB (SILVA, 2018).

De acordo com Araújo (2006 Apud Santos et al 2013) as OL agem entre o Rio Grande do Norte e o norte da Bahia, no intervalo de maio a agosto, são responsáveis pelas chuvas que caem na área do BSF. Já Santos et al. (2010) observaram que existe uma grande correlação entre a precipitação e a atividade das OL no BSF nos meses de fevereiro, março e abril.

Uma dessas ondas, em julho de 2010, esteve diretamente associada a uma das maiores tragédias ocorridas no leste do NEB (LACERDA, 2018), episódio no qual áreas de Pernambuco e de Alagoas ficaram devastadas. A mesma região, em maio de 2017, sofreu com a ocorrência de chuvas intensas, combinada com tempestades, produzindo inundações quase instantâneas em algumas Bacias hidrográficas desses estados.

Melo et al. (2019) observaram em seu trabalho, um estudo de caso de caracterização das OL ocorrido em junho de 2019 no NEB, que a influência desses distúrbios alterou notadamente a média das variáveis meteorológicas, aumentando os valores diários em relação a uma média

mensal. De acordo com o estudo, o fenômeno trouxe à cidade de Recife um dos mais elevados índices de precipitação em 24 horas dos últimos 30 anos.

### 2.3.3 Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VCAN) e Vórtices Ciclônicos de Médios Níveis (VCMN)

Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN<sub>s</sub>) são sistemas meteorológicos identificados por centros de baixa pressão, de escala sinótica e são concebidos na alta troposfera, apresentam circulação ciclônica fechada e seu centro é mais frio que sua vizinhança. A origem e a manutenção dos VCANs observados na região do NEB, estendem-se desde o nível de 700 hPa até o nível de 300 hPa (ARAGÃO, 1975; KOUSKY e GAN, 1981; FEDOROVA, 2017).

Valverde Ramirez (1996) e Ramirez, Kayano e Ferreira (1999) investigaram os VCANs durante um período de dez anos, utilizando imagens de satélites. Seus resultados mostraram que a maior frequência de ocorrência desses sistemas foi durante o verão, sendo o mês de janeiro o de máxima ocorrência.

Cavalcanti et al. (2009) destacam que esses sistemas são quase estacionários, no entanto, podem deslocar-se tanto para leste quanto para oeste, lentamente, com tempo de vida de até vários dias.

De acordo com Ramirez (1997 apud COUTINHO, 2010), devido sua persistência e deslocamento, os VCAN<sub>s</sub> têm um papel importante no regime de precipitação de regiões dos trópicos e extratropicais, além do mais, contribuem nas trocas de energia entre essas regiões.

No Brasil, os VCAN<sub>s</sub> de origem tropical atuam com mais frequência no intervalo de dezembro a fevereiro e as áreas que sofrem maiores interferências são Sul, Sudeste e Nordeste, no entanto, esses sistemas podem ocasionar, especificamente no NEB, secas em algumas regiões e inundações em outras (SILVA, 2002 apud COUTINHO, 2010).

Para uma melhor compreensão do papel desses vórtices na dinâmica pluviométrica do NEB, Cavalcanti et al (2009) sugerem que é importante saber que os VCANs interagem com outros sistemas, a Alta da Bolívia (AB) e com a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS).

Outro sistema meteorológico, os Vórtices Ciclônicos de Médios Níveis (VCMN<sub>s</sub>) representam, por definição, uma circulação fechada observada apenas nos médios níveis atmosféricos, e são, por tanto, notados na região tropical do Atlântico Sul, com seu centro localizado entre 700 e 400 hPa (FEDOROVA, 2017).

Segundo Fedorova (2019) pouco se sabe sobre os processos de formação e sua influência no tempo das regiões, pois foram descobertos há pouco tempo e ainda não se têm informações satisfatórias sobre esses sistemas. No entanto, nota-se que os VCMNs acontecem especialmente no NEB, verificando que estão associados a regiões bastante secas no nível de 700-400hPa, o que corrobora com Fedorova (2017).

#### 2.3.4 Complexo Convectivo de Mesoescala (CCM) e Linhas de Instabilidade (LI)

Os Complexos Convectivos de Mesoescala (MCC) são aglomerados de nuvens convectivas de formas variadas que pertencem ao grupo dos Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM), e são sistemas aproximadamente circulares e de vida longa, os quais podem desencadear eventos climáticos extremos, como chuvas fortes, podendo originar situações de risco para a população (LYRA, 2020).

Conforme Cavalcante (2009), os critérios originais de classificação de um CCM, os quais foram definidos inicialmente por Maddox (1980), levam em consideração o tamanho, a forma e o tempo de vida desses sistemas. Ademais, o CCM evolui por todo o seu ciclo de vida, mudando suas características de intensidade, tamanho e forma (CAVALCANTI, 2009). A ocorrência desses sistemas se dá nos oceanos tropicais e em todos os continentes, exceto na Antártica (LYRA, 2020).

Na América do Sul, os eventos relacionados aos CCM costumam iniciar e terminar mais tarde do que os que ocorrem no Hemisfério Norte, sendo as regiões preferenciais de ocorrência o norte da Argentina, Paraguai e Sul do Brasil (MORAES, 2016). No NEB, os CCM se desenvolvem principalmente sobre o continente, sobretudo, durante o outono e o verão por causa do potencial convectivo da região e por estar associado à ZCIT, favorecendo a atividade convectiva na região (LYRA et al, 2018a).

Lyra et al. (2018b) analisaram um CCM ocorrido em março de 2015 sobre o semiárido brasileiro, o qual ocasionou aumento na precipitação e eventos de trovoadas para a região, sendo a ZCIT o principal sistema associado à sua formação. Os autores expõem que condições termodinâmicas da atmosfera no dia do evento, como temperatura e umidade do ar, mostraram-se favoráveis ao desenvolvimento do CCM observado.

Outro SCM observado no NEB e associado à ocorrência de elevados valores pluviométricos na região são as linhas de instabilidade (LI). As LIs são bandas de nuvens originadoras de chuva, organizadas em forma de linha, por isso recebem esse nome, e a formação se dá por causa da grande quantidade de radiação solar incidente sobre a região tropical, o que

proporciona o desenvolvimento de nuvens do tipo cúmulos (FERREIRA, 2005). De acordo com o autor, as LIs atingem um número maior à tarde e início da noite, quando a convecção é máxima, levando a ocorrência de chuvas.

As LIs manifestam-se frequentemente na costa norte-nordeste da América do Sul, podendo ocorrer a propagação para o interior do continente, causando volumes consideráveis de precipitação. A grande convecção nos trópicos tem um papel fundamental na circulação global e na energética da atmosférica tropical, por isso essas LIs são um dos sistemas atmosféricos mais importantes no transporte de calor para a alta troposfera (CAVALCANTI, 2009).

### 2.3.5 Sistemas Frontais

A passagem de sistemas frontais pelas diversas áreas do globo é importante na determinação das condições do tempo local. Na América do Sul esses sistemas são responsáveis, sobretudo, por acumulados consideráveis de chuva (ANDRADE, 2004). Dessa forma, os sistemas frontais assumem um papel relevante na identificação do tempo de determinada região, pois originam alterações bruscas nas condições observadas.

No Brasil, as frentes frias têm atividade durante todo o ano e afetam mais significativamente as regiões Sul e Sudeste (CAVALCANTI e KOUSKY, 2003). No entanto, como abordado por Kousky (1979), a entrada de sistemas frontais também tem papel importante na precipitação no sul do NEB, mostrando que a frequência de frentes frias diminui com o decréscimo da latitude, e que existe uma variabilidade sazonal.

Andrade (2004) estudou a frequência de sistemas frontais em algumas áreas selecionadas no Brasil, para as quatro estações do ano, durante o período de 1980 a 2002 e constatou que existe uma predominância de diminuição de sistemas frontais à medida que há um deslocamento para norte. Notou que é no inverno que há um maior número de frentes passando por todas as áreas selecionadas no estudo.

Na BHSF, Souza (2012) sugeriu que os sistemas frontais atuaram principalmente sobre o ASF, no entanto, as chuvas do período analisado ocorreram predominantemente abaixo da média histórica, contribuindo negativamente no nível de água dos reservatórios da região.

Alves et al. (2017) utilizaram dados diários de precipitação de um conjunto de estações pluviométricas distribuídas sobre o NEB, estendendo-se de 1974 a 2003, e um dos resultados mais expressivos indicou que as frentes frias se configuram como um fator físico essencial para instabilizar a atmosfera e produzir precipitação mais intensa e homogênea sobre o NEB.

### 2.3.6 ENOS e Variabilidade do Oceano Pacífico

El Niño e La Niña são partes de um mesmo fenômeno interanual atmosférico-oceânico que ocorre no Oceano Pacífico Equatorial denominado El Niño Oscilação Sul (ENOS), e que exerce profundos impactos sobre o clima global, sendo a principal fonte de variabilidade climática interanual global (YANG, 2018; INPE, 2020).

De acordo com CPTEC (2020), o ENOS está associado a períodos de aquecimento (El Niño) ou resfriamento (La Niña), em relação à média normal histórica, e essas mudanças na temperatura das águas do oceano acarretam efeitos globais na temperatura e na precipitação. Por isso, de acordo com Cavalcanti (2009), o ENOS produz alterações na temperatura da superfície do mar (TSM), na pressão, no vento e na convecção tropical com reflexo em vários lugares do planeta, incluindo o Brasil.

A ocorrência do ENOS está associada a eventos de secas (El Niño) e enchentes (La Niña) no NEB, que segundo Vianello (2001 apud FREIRE, 2011), acaba afetando principalmente a região semiárida, porção na qual grande parte da população depende quase que exclusivamente das chuvas para sua subsistência. Em consonância, Sousa (2012) concluiu que existe uma boa relação entre a atuação do ENOS e a variabilidade no volume das chuvas na região semiárida do NEB. De acordo com o primeiro autor, o El Niño de 1997/98 foi considerado o mais forte do século para a Região, provocando grandes transtornos sociais, econômicos e ambientais em virtude da forte seca. Já em 2008, a ocorrência da La Niña, considerada como forte, causou enchentes em partes do NEB.

De acordo com Cavalcanti (1996), um dos episódios considerado mais longo de ENOS foi o que aconteceu de 1990 até o início de 1995, onde ocorreram anomalias de precipitação nas Regiões Nordeste e Sul do Brasil. No NEB, a consequência foi um extenso período de seca, de 1990 a 1993. O estudo ressaltou que durante este período as anomalias no Pacífico Equatorial foram mais intensas em 1992 e, ao mesmo tempo em que houve um excesso de precipitação no Pacífico Equatorial, houve déficit no NEB, associado à fraca intensidade da ZCIT. Essa situação se deu por causa do comportamento anômalo de sistemas que atuam no Brasil.

Todavia, em 2015-2016 ocorreu um vistoso evento de aquecimento El Niño, o mais forte já registrado, ficando popularmente conhecido como El Niño Godzilla e que teve como principais consequências secas severas e enchentes intensas nas regiões dos trópicos (SCHIERMEIER, 2015; SÁNCHEZ, 2017).

Sobre a BHRS, Galvínio (2002) verificou que em anos em que ocorre El Niño, as chuvas aparecem com aumento significativo nas regiões do ASF e do MSF, juntas correspondendo a 80% da área da Bacia, já no BSF, constatou-se diminuição. Em anos de La Niña ocorre o contrário. Dessa forma, a autora averiguou que é provável que em anos de El Niño a BHSF receba mais água do que em anos de La Niña, concluindo que o impacto do El Niño sobre a Bacia é positivo, ao contrário do que acontece para o NEB em geral.

Filgueira et al. (2007) constataram a relação entre os efeitos do El Niño e a estiagem no NEB, mostrando sua relação com os problemas socioeconômicos e a degradação dos solos da Região. Por outro lado, Moraes e Nery (2009) observaram que no Sudeste do Brasil a intensificação desse mesmo fenômeno está associada às precipitações acima da média na região (apud GUILHERME, 2017).

Santos et al. (2011) estudaram o grau de relação entre eventos hidrológicos extremos e a distribuição espacial das anomalias de chuvas em algumas partes da BHSF em condições atmosféricas sob a influência do ENOS. A partir dessa análise, chegou-se à conclusão que o ENOS tem influência significativa no padrão de anomalias positivas e negativas de chuva e consequentes mudanças do regime hidrológico da Bacia.

Silva et al (2000, apud Guimarães, 2017) mostra que, em sua fase negativa, ou seja, no El Niño, o fenômeno exerce influência marcante nas chuvas sobre o NEB. Constatou-se que há uma diminuição das precipitações na Região. Os autores consideraram o mesmo ano de ocorrência do El Niño e até dois anos depois para concluir essa tendência.

#### 2.3.7 Dipolo do Atlântico e Variabilidade do Oceano Atlântico

Não só o Oceano Pacífico interfere nos índices pluviométricos sobre o NEB; o Oceano Atlântico também exerce grande influência nas chuvas da Região. Por tanto, um outro tipo de interação atmosfera-oceano que pode causar anomalias climáticas nessas áreas é o chamado Dipolo do Atlântico, um padrão de anomalias da TSM sobre o Oceano Atlântico Tropical que apresenta variabilidade de periodicidade decenal (KAYANO e CAPISTRANO, 2014).

Esse Dipolo surge quando as águas do Atlântico Tropical Norte estão mais quentes e as águas do Atlântico Equatorial e Tropical Sul estão mais frias, ocasionando movimentos descendentes que carregam ar frio e seco dos altos níveis atmosféricos, inibindo assim, a formação de nuvens e diminuindo a precipitação. Essa situação é chamada de fase positiva do Dipolo. Já quando ocorre o contrário, tem-se aumento nos movimentos ascendentes, intensificando a

formação de nuvens e aumento dos índices pluviométricos, denominando-se fase negativa do dipolo (MOURA e SHUKLA, 1981; PEZZI e CAVALCANTI, 2001).

Já quando o Dipolo do Atlântico está na fase negativa, há o favorecimento de chuva acima da média sobre o NEB, mais especificamente sobre o leste do NEB e em sua fase positiva, há o favorecimento de chuva abaixo da média na Região (ANDREOLI e KAYANO, 2007).

Servain et al. (1998) afirmam que o Dipolo de TSM do Atlântico Tropical constitui um bom indicador da qualidade da estação chuvosa, especialmente em anos de condições neutras sobre o Oceano Pacífico. De modo especial sobre o Brasil, de acordo com Kayano e Capistrano (2014), este padrão está associado com mudanças nos valores de precipitação sobre as Regiões Nordeste e Norte já que o Dipolo apresenta correlações fortes com as chuvas dessas localidades.

Segundo Ferreira (2005), quando o El Niño acontece em conjunto com o Dipolo positivo do Atlântico, causam anos secos no NEB e quando o fenômeno La Niña está associado ao Dipolo negativo do Atlântico, normalmente ocorrem anos considerados normais, chuvosos ou muito chuvosos na região. Assim, os Oceanos Pacífico e Atlântico, atuando separadamente ou em conjunto, desempenham um papel importante na variabilidade interanual das chuvas no NEB.

De acordo com Silva (2004), para a BHSF especificamente, ao contrário do impacto do El Niño no abastecimento de água, o Dipolo do Atlântico atua como inibidor das chuvas sobre a região, diminuindo a quantidade de água sobre a Bacia.

Em concordância, Assis (2018) concluiu que tanto o Oceano Atlântico Tropical Norte quanto o Tropical Sul influenciam no comportamento das chuvas no SMSF, sobretudo quando o Oceano Atlântico Tropical Norte apresenta aquecimento maior que o Sul, induzindo a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) a se posicionar mais a norte da linha do Equador, provocando redução da precipitação.

### 2.3.8 Escalas temporais

O entendimento do clima vem mudando com o tempo, pois, segundo Ludwig et al. (2012), antigamente, ele era considerado “fixo” na escala de tempo e a base para previsão era regida apenas por variações sazonais. No entanto, é notório que o clima do NEB é marcado por uma evidente variabilidade temporal da precipitação, que se demonstra em diversas escalas. Isso ocorre por causa da influência de diversos sistemas e fenômenos meteorológicos e climáticos.

Escalas de tempo sazonais são o resultado de variações de larga escala na temperatura da superfície do mar, que podem originar o fenômeno El Nino, por exemplo, além da variação na temperatura de solo e neve. Nessa situação, precipitações anômalas perduram e podem provocar secas e enchentes (LUDWIG et al., 2012). A sazonalidade se verifica quando a série é motivada por componentes semestrais, anuais, etc.

De acordo com Marengo (2009a), variações sazonais representam um papel primordial na movimentação de sistemas hidrelétricos, sobretudo em países de grandes dimensões como é o caso do Brasil, as quais podem ser complementares entre as diversas regiões do país.

Ainda tratando de nível sazonal, uma estação chuvosa fraca ou bastante forte, adicionada a relativas altas temperaturas por causa de anomalias de temperatura da superfície do mar no Oceano Pacífico Tropical, no Atlântico Tropical ou no Subtropical, podem apresentar grandes impactos sobre a população e os setores econômicos que dependem da acessibilidade de água (MARENGO, 2009b).

Da Silva et al. (2013) utilizaram as Análises de Ondaletas para identificar as possíveis causas para a variabilidade na temperatura máxima do Ceará e confirmaram que todas as macrorregiões do estado sofrem, também, influência das variações de escalas sazonais, principalmente, e de acordo com Costa, Mateus e Da Silva (2014) ligadas ao ENOS, ao Dipolo do Atlântico, ao ciclo de Manchas Solares e à Oscilação Decadal do Pacífico.

Em se tratando de escala de tempo semestral, aquela em que as variações no sistema ou fenômeno meteorológico ocorrem dentro de um período, em média, menor que um ano, Santos et al. (2012) verificaram, usando o SPI no período de 1980-2011, que as características dos eventos extremos chuvosos e secos na cidade de Belém – PA, ocorreram na escala de tempo de 6 meses, ou seja, variabilidade semestral.

A escala semestral do SPI, por exemplo, representa os eventos de média duração, sendo importante para o acompanhamento de períodos de transição entre estações. Braga et al. (2012), também utilizando SPI na escala de tempo semestral, identificaram os eventos semestrais secos e chuvosos na região situada ao Norte do Maranhão, para séries climatológicas de 1980 a 2011.

Já na escala de tempo interanual, Grimm (2009) afirma que o ENOS é a principal fonte de variabilidade de precipitação no Brasil, influenciando o clima e a agropecuária de várias partes do mundo.

Conforme Carvalho e Oyama (2013) o fenômeno El Niño exerce, em escalas de tempo interanual, um papel fundamental na variabilidade da ZCAS, promovendo mudanças em sua intensidade e deslocamento, modulando a variabilidade no padrão de “gangorra” na precipitação da América do Sul.

Alves (2012) ressalta a importância do fenômeno ENOS e do dipolo de TSM no Atlântico Tropical, afirmando sua significativa influência na variabilidade climática interanual no NEB.

Os períodos de condições anormais de aquecimento e resfriamento das águas do Oceano Pacífico durante o fenômeno ENOS dura em torno de 12 a 18 meses, variando entre El Niño e La Niña, e podem ocorrer em intervalos de dois a sete anos. Essas condições têm início no primeiro trimestre do ano e atingem sua máxima intensidade em dezembro de um ano e janeiro do próximo ano, finalizando até meados do segundo ano (DA SILVA, 2009b).

Segundo Cunha et al. (2011), as anomalias de chuva relacionadas com as fases do ENOS atingem as mesmas regiões nos mesmos períodos do ano, porém de forma oposta. O tempo médio de duração de um episódio El Niño varia entre nove meses a um ano, podendo alguns serem mais curtos e outros mais longos. Já os episódios de La Niña têm sua duração por um período de nove a doze meses, aproximadamente, e somente alguns episódios persistem por mais que 2 anos (CPTEC, 2020).

No entanto, em algumas situações, o ENOS tem seu período de atuação maior que o habitual, ou seja, mais ou menos maior que o intervalo entre quatro e oito anos. Quando o fenômeno ENOS apresenta duração maior que o normal, ele recebe a denominação de ENOS estendido (CAVALCANTI, 1996).

Da Silva et al. (2020) analisaram os anos de eventos secos e chuvosos no período de 1961 a 2014, para o leste do Nordeste e identificaram que foi observada variabilidade da precipitação com escala de 7 e 8 anos, relacionadas com eventos ENOS estendido.

Alguns estudos como os de Molion (2006) associam variações pluviométricas ao ciclo de manchas solares, no qual associa as secas nordestinas com as manchas solares, relacionando essa conexão à aproximação de Júpiter à Terra a cada 12 anos.

O período de um ciclo de manchas solares é definido como o tempo decorrido desde o mínimo anterior até seu máximo e o mínimo seguindo até seu máximo. Por essa definição, o período de um ciclo depende do comportamento do ciclo anterior e do seguinte. A duração de um

ciclo de manchas solares é uma característica chave e as variações nos períodos do ciclo têm sido bem estudadas (HATHAWAY, 2015).

De acordo com a NASA (2020), a principal variação solar ocorre ao longo de um ciclo de aproximadamente 11 anos. No início de um ciclo, as manchas solares são esparsas. As manchas aumentam gradualmente ao longo de vários anos, atingem o pico e, subsequentemente, diminuem ao longo dos próximos anos.

Em conformidade com alguns trabalhos, como abordado em Da Silva (2003), períodos de aproximadamente 21 anos também podem estar correlacionados com ciclos de atividade solar.

Contudo, o Sol também possui outros ciclos conforme sua atividade, como o ciclo de Hale que possui um período de aproximadamente 22 anos (RIGOZO e NORDEMANN, 2000) e os ciclos menores que onze anos observados Bolzan (2004), período em torno de quatro a oito anos.

Segundo NOAA e NASA (2020), em oito meses desse mesmo ano, a atividade solar aumentou de forma constante, indicando que atualmente está em atividade um novo ciclo solar, o ciclo 25, previsto para que seja um ciclo bastante fraco, com mesma intensidade do ciclo anterior. O novo ciclo tem máximo de atividade das manchas solares previsto para julho de 2025 e um pico de 115 manchas solares.

O modo de Dipolo envolve variações de TSM nos dois Hemisférios, em escalas de tempo sazonal, interanual e decenal (SERVAIN, 1991 apud DA SILVA et al., 2010). Clauzet e Wainer (1999) correlacionam o Dipolo do Atlântico à escala de 7 ou 11 anos e que no NEB, o impacto do dipolo é significativo na escala decadal. Esses resultados também são verificados para o NEB e sua variabilidade de precipitação está mais bem relacionada com as condições do Oceano Atlântico tropical, do que com as do Pacífico tropical (KAYANO E ANDREOLI, 2006 apud DA SILVA et al., 2010).

Zhang et al. (1997 apud DA SILVA et al., 2010) dissociou a variabilidade temporal do Oceano Pacífico em duas partes: a primeira referente à escala de variação interanual do ciclo ENOS, e a segunda alusiva à variabilidade interdecadal. Além do mais, os espectros das séries de anomalias de TSM, para os Oceanos Atlântico e Pacífico, são caracterizados por oscilações em escalas de tempo interanual e decadal, sendo a escala decadal mais pronunciada no Oceano Atlântico.

De acordo com Kayano (2014), a Oscilação Multidecadal do Atlântico (OMA) apresenta quase as mesmas anomalias de TSM no Atlântico Norte e foi caracterizada com mais precisão quando dados de TSM mais longos e de melhor qualidade tornaram-se disponíveis.

Segundo Goly e Teegavarapu (2014), a OMA é um fenômeno de variabilidade natural de baixa frequência, em que é averiguada uma flutuação na TSM do Atlântico Norte, com pronunciada variabilidade climática no campo da TSM em um intervalo, de acordo com Delworth e Mann (2000) de 5 a 8 décadas.

Da Silva et al. (2010) enfatizaram que apesar da variabilidade de TSM no Oceano Pacífico ser fortemente influenciada pela variabilidade interanual associada ao ENOS, outros fenômenos de escala de tempo mais longa também atuam neste setor, como a Oscilação Decenal ou Decadal do Pacífico (ODP).

A Oscilação Decadal do Pacífico (ODP) é um fenômeno muito semelhante aos eventos do ENOS, já que se trata de uma variação das temperaturas do Oceano Pacífico, no entanto apresenta uma variação climática mais longa, por volta de 20 anos e ocorre no sentido Leste/Oeste e simultaneamente, sentido Norte/Sul no Oceano Pacífico Norte e Sul. A ODP representa os efeitos de diferentes processos operando em diferentes escalas de tempo (NEWMAN, 2016).

A ODP apresenta duas fases bem definidas e simultâneas, uma positiva, que se caracteriza por um aumento da temperatura das águas do Pacífico Extratropical e outra negativa, quando há uma diminuição da temperatura no Pacífico Tropical. Como o Pacífico ocupa cerca de um terço da superfície terrestre, mudanças na temperatura de suas águas têm impactos generalizados nos sistemas naturais, por isso as variações da ODP influenciam diretamente o clima dos continentes (MANTUA e HARE, 2002; MOLION, 2005).

No Brasil, durante a fase positiva da ODP, o NEB tende a registrar um maior número de anos com índices pluviométricos abaixo da média, com temperaturas superiores e maior período de estiagem. Por outro lado, durante a ODP negativa, essa região volta a contar com um regime mais frequente de chuvas e umidade, embora essa intensidade ainda não seja elevada por causa das características geoclimáticas locais (ANDREOLI E KAYANO, 2005; DA SILVA E GALVÍNCIO, 2011).

O Oceano Pacífico também apresenta um modo de variabilidade interdecadal, a Oscilação Interdecadal do Pacífico (OIP), semelhante à ODP. A OIP é um fenômeno oceanográfico/meteorológico que se dá em uma área mais extensa do Pacífico. Ao passo que a

ODP se processa em latitudes média no Hemisfério Norte, a OIP se ramifica do Hemisfério Sul para o Norte (MANTUA et al., 1997).

Chao, Ghil e McWilliams (2000) fizeram análises acerca das temperaturas da superfície do mar no Oceano Pacífico que revelaram uma oscilação interdecadal com um período de 15 a 20 anos. Segundo os autores este Oceano é conhecido por apresentar fortes variações em escalas de tempo interanuais e interdecadais, sendo as flutuações interanuais no Oceano Pacífico tropical associadas principalmente ao fenômeno ENOS.

## **2.4 Impactos da variabilidade climática sobre a disponibilidade hídrica de reservatórios e sobre as atividades humanas**

Os recursos hídricos, sobretudo em regiões áridas e semi-áridas, são altamente vulneráveis devido à alta variabilidade dos sistemas meteorológicos. Além disso, as mudanças climáticas podem alterar o padrão da disponibilidade de água nessas regiões onde a demanda de abastecimento de água das populações é grande (AKBAS ET AL., 2020).

Segundo o relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas - IPCC (2007), prevê-se que as mudanças climáticas afetam a hidrologia da maioria das regiões por meio da influência na temperatura, precipitação, evapotranspiração, escoamento, além de influenciar no planejamento e desempenho de reservatórios. Para uma melhor gestão dos sistemas de recursos hídricos, esses impactos gerados pelas mudanças climáticas devem ser quantificados (SOUNDHARAJAN, 2016).

De acordo com Studart et al. (2001), dois dos principais impactos na variabilidade climática em reservatórios são a mudança em suas contribuições de água e na variação da evaporação, a qual, em regiões áridas e semiáridas, esta última é considerada um dos principais componentes no balanço hídrico dos reservatórios.

Segundo Tucci (2002), ações humanas sobre os sistemas hídricos e modificações da superfície da Bacia provocam perturbações significativas sobre seu escoamento. Esses dois pontos podem provocar mudanças importantes sobre os sistemas hídricos, como desmatamento através da extração seletiva de madeira, plantio de subsidência, culturas permanentes, entre outros.

Marce et al. (2010) indicaram que a vazão deve ser considerada uma variável chave na avaliação do impacto das mudanças climáticas na qualidade da água de reservatórios. Esse fato é especialmente relevante em regiões do mundo onde os reservatórios são abundantes e a maioria dos modelos climáticos prevê uma diminuição do escoamento nas próximas décadas.

Ma et al. (2010) identificaram que a variabilidade climática e a atividade humana foram as duas principais razões para a diminuição do fluxo do reservatório de Miyun, localizado em Pequim, China, sendo a primeira razão se referente às mudanças na precipitação e na temperatura, e a segunda, à retirada direta de água do rio e ao impacto indireto por causa das mudanças feitas pelo homem no uso da terra e na vegetação próxima do reservatório.

A importância da adaptação humana em relação à questão das mudanças climáticas é afirmada nas Diretrizes do IPCC. Esse documento lista alguns pontos importantes neste sentido, os quais: redução da produção agrícola nas regiões tropicais e subtropicais; diminuição da disponibilidade hídrica nas regiões com deficiência de água, principalmente em regiões subtropicais; aumento de pessoas sujeitas a doenças veiculadas pela água e aumento da mortalidade devido ao aquecimento; aumento generalizado de risco de inundações para a população devido ao aumento da intensidade da precipitação e aumento do nível do mar (SMITHERS, 1997; TUCCI, 2002).

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1 Área de estudo

A Bacia hidrográfica do Rio São Francisco (Figura 1), localizada entre as coordenadas 7°17' a 20°50' de latitude sul e 36°15' a 47°39' de longitude oeste, é formada por diversas sub-bacias que deságuam no rio principal, o São Francisco, e por sua vez, no Oceano Atlântico (BROCCA et al., 2013).

Figura 1: Localização da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco.



Fonte: ANA (2015).

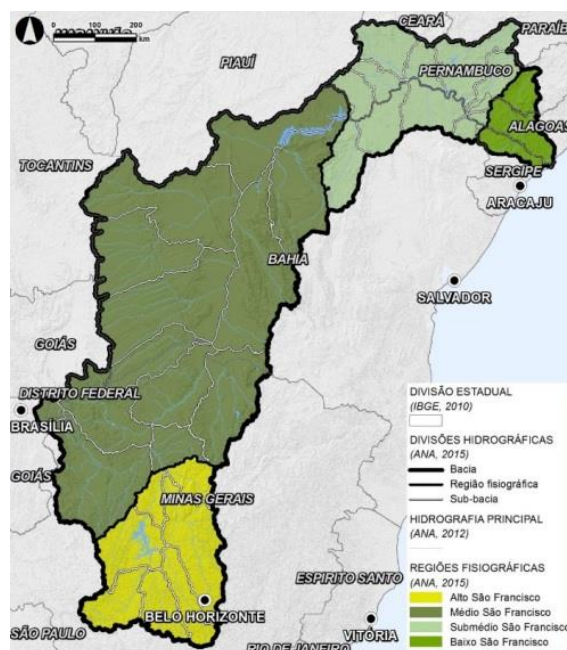
Essa Bacia ocupa uma área correspondente a 7,5 % do território brasileiro, com aproximadamente 640.000 km<sup>2</sup> de área de drenagem e uma vazão média de 2.850 m<sup>3</sup>/s, passando por sete estados brasileiros: Alagoas, Sergipe, Pernambuco, Bahia, Minas Gerais, Distrito Federal e Goiás. Isso representa cerca de 9 % do total de municípios do país e 34 sub-bacias (ANA, 2020).

Desse total de território, em torno de 54 % da área encontra-se no semiárido, com registros de períodos críticos de estiagem, o qual enfrenta condições hidrológicas adversas desde 2012, com vazões e precipitações abaixo da média e significativa redução nos níveis de seus reservatórios (CBHSF, 2016; ANA, 2020).

De acordo com a ANA (2020), em 2018 as vazões naturais médias anuais nos reservatórios da Bacia do São Francisco superaram os valores observados no ano anterior, porém ainda ficaram aquém da média. Contabilizando os dados desde 1931, Sobradinho e Três Marias alcançaram apenas 50 % e 52 % da média histórica, respectivamente.

Em virtude de sua grande extensão territorial e das acentuadas diferenças socioeconômicas, com áreas ricas e bastante povoadas e áreas de pobreza crítica e população dispersa, foi proposta a divisão das áreas de drenagem nas quatro sub-regiões mostradas na Figura 2: ASF, MSF, SMSF e BSF (CBHSF, 2016; FONSECA et al., 2020).

Figura 2: Divisão da BHSF em quatro sub-regiões.



Fonte: ANA (2017)

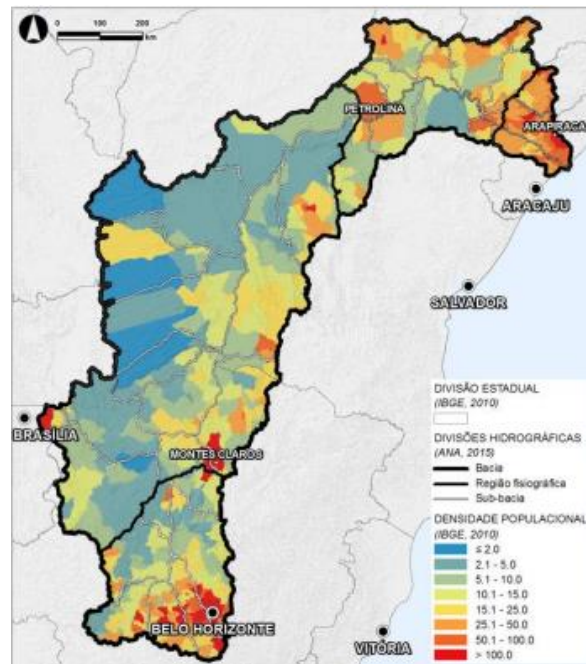
A Região Hidrográfica do São Francisco possui 503 municípios e uma população total de aproximadamente 14,3 milhões de habitantes, segundo os dados informados pelo IBGE de 2010, e a maior parte da população está alocada na zona urbana. A Tabela 1 traz algumas características das áreas, sedes de municípios e quantitativo de população da região hidrográfica do São Francisco e a Figura 3, a densidade demográfica dessa região.

Tabela 1: Características da Região Hidrográfica do São Francisco.

| Bacia Hidrográfica      | Área (ha) | Sedes municipais (nº) | Pop. Urbana (nº) | Pop. Rural (nº) | Pop. Total (nº) |
|-------------------------|-----------|-----------------------|------------------|-----------------|-----------------|
| Alto São Francisco      | 100.085   | 151                   | 6.706.784        | 368.803         | 7.075.587       |
| Médio São Francisco     | 402.491   | 156                   | 2.189.862        | 1.349.447       | 3.539.309       |
| Sub-médio São Francisco | 110.473   | 73                    | 1.340.371        | 893.532         | 2.233.903       |
| Baixo São Francisco     | 25.417    | 72                    | 775.351          | 665.803         | 1.441.154       |
| RH São Francisco        | 638.466   | 452                   | 11.012.368       | 3.277.585       | 14.289.953      |

Fonte: ANA (2015)

Figura 3: Densidade demográfica na BHSF.



Fonte: CBHSF (2016).

### 3.2 Dados

Foram utilizados dados de precipitação e níveis dos reservatórios para as quatro sub-regiões da BHSF. Nestas, foram selecionados 8 postos meteorológicos, dos quais, 4 pluviométricos e 4 fluviométricos, o mais próximo possível dos principais reservatórios de cada sub-região, tais como os reservatórios de Três Marias, Sobradinho, Itaparica e Xingó. Todos os dados foram obtidos através do portal HidroWeb, ferramenta integrante do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), da Agência Nacional das Águas (ANA) disponíveis no site [www.ana.gov.br/hidroweb](http://www.ana.gov.br/hidroweb).

Foram utilizados os dados das sub-bacias ASF, MSF, SMSF e BSF, para um mesmo período de tempo, de 1968 a 2020. No entanto, o período de dados de nível da estação referente a sub-bacia SMSF é menor, pois nos anos iniciais de observações, não constam registros. Dessa forma, para esta, o período de dados começou em abril de 1972.

Para a seleção das estações, o critério utilizado foi a disponibilidade de, pelo menos, 30 anos de observações e a proximidade do reservatório em estudo.

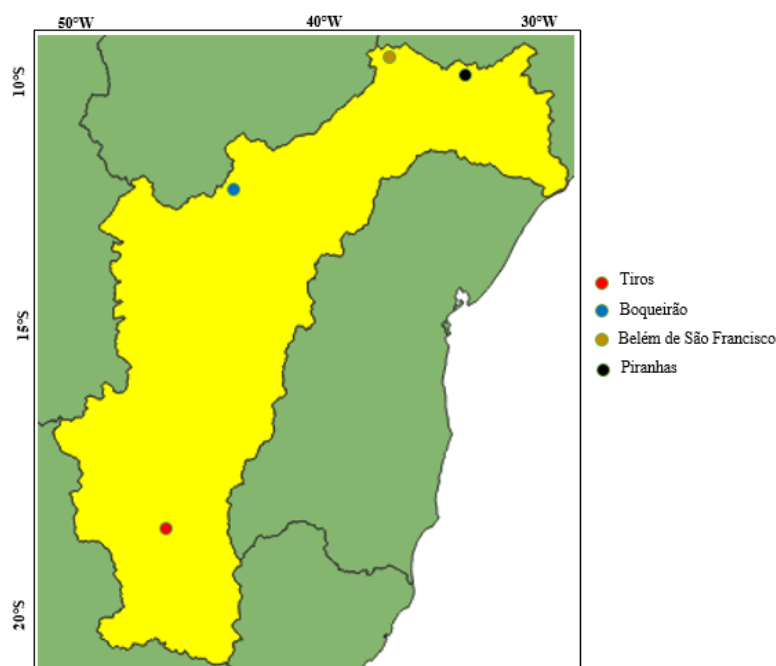
As informações acerca dos postos pluviométricos inicialmente selecionados para as análises estão expostas na Tabela 2 e a Figura 4 mostra a localização espacial desses postos na BHSF.

Tabela 2: Postos pluviométricos das sub-regiões da BHS.

| Sub-bacias              | Posto   | Estação                | Latitude  | Longitude |
|-------------------------|---------|------------------------|-----------|-----------|
| Alto São Francisco      | 1845014 | Tiros                  | -18,9997° | -45,966°  |
| Médio São Francisco     | 1143010 | Boqueirão              | -11,3553° | -43,8456° |
| Sub médio São Francisco | 838004  | Belém de São Francisco | -8,765°   | -38,9606° |
| Baixo São Francisco     | 937023  | Piranhas               | -9,6261°  | -37,7561° |

Fonte: ANA (2021).

Figura 4: Localização dos postos pluviométricos na BHSF.



Fonte: Autor (2022).

Por ser uma Bacia de grandes dimensões, a BHSF apresenta características distintas em cada um de seus trechos, por isso foi selecionado um posto pluviométrico para representar cada sub-região, denominadas de estações Tiros, Boqueirão, Belém de São Francisco e Piranhas, localizados, respectivamente, nos estados de Minas Gerais (ASF), Bahia (MSF), Pernambuco (SMSF) e Alagoas (BSF). A escolha desses postos foi motivada pela proximidade dos principais reservatórios de cada sub-região da Bacia e respeitando os critérios adotados inicialmente. Os reservatórios são, na devida ordem, Três Marias, Sobradinho, Itaparica e Xingó.

No tocante aos níveis dos reservatórios, foram analisadas as séries de níveis/cotas de quatro postos fluviométricos representativos, os quais estão localizados nas estações de Major Porto (ASF), Morpará (MSF), Serra Talhada (SMSF) e Piranhas (BSF), igualmente para

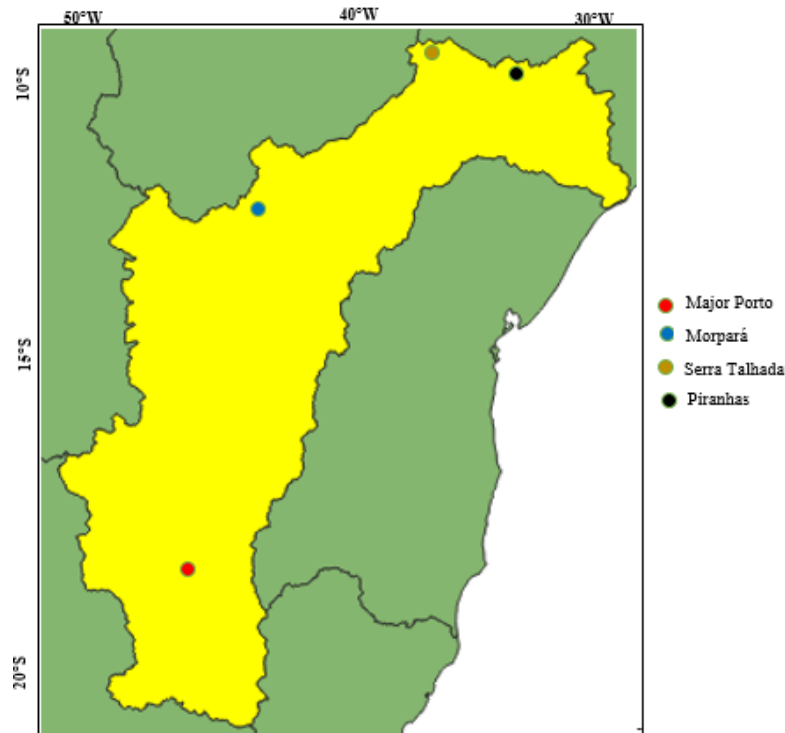
representar cada sub-região e para o mesmo período de tempo, de 1968 a 2020. Os postos fluviométricos empregados no trabalho e suas informações básicas estão dispostos na Tabela 3 e a localização espacial desses postos na BHSF está mostrada na Figura 5.

Tabela 3: Postos fluviométricos das sub-regiões da BHSF.

| Sub-bacias              | Posto    | Estação       | Latitude  | Longitude |
|-------------------------|----------|---------------|-----------|-----------|
| Alto São Francisco      | 41050000 | Major Porto   | -18,7064° | -46,0397° |
| Médio São Francisco     | 46360000 | Morpará       | -11,5583° | -43,2825° |
| Sub médio São Francisco | 48840000 | Serra Talhada | -8,0006°  | -38,2447° |
| Baixo São Francisco     | 49330000 | Piranhas      | -9,6261°  | -37,7561° |

Fonte: ANA (2021)

Figura 5: Localização dos postos fluviométricos na BHSF.



Fonte: Autor (2022).

Para que a análise das informações se torne mais completa e organizada, os anos com falhas ou ausência de dados foram preenchidos a partir do método das médias climatológicas, como utilizado por outros autores (FILL, 1987; BERTONI e TUCCI, 2007; DA SILVA, 2009; STRECK et al., 2009; OLIVEIRA et al., 2010; SILVA, 2015; DA SILVA, 2017). Esse método consiste no cálculo das médias mensais climatológicas de cada mês e o preenchimento das falhas mensais com essas médias.

Os dados de precipitação e nível fluviométrico foram organizados e tratados, após a inserção das médias dos dados ausentes no Software Excel. As tabelas geradas trarão as informações para cada mês dos anos de 1968 a 2020, sendo as lacunas preenchida com a média climatológica de cada mês.

### 3.3 Uso de SPI

Fazer o diagnóstico da seca é um trabalho importante, principalmente em regiões que são gravemente afetadas por ela, como ocorre em algumas localidades no decorrer da BHSF. Esse tipo de estudo traz informações preciosas para avaliar as dimensões e os prováveis impactos que possam vir a ocorrer, podendo estimular os gestores a investir mais no planejamento e mitigação de eventos hidrológicos extremos.

O monitoramento desses eventos pode ser feito através da utilização de índices. Baseando-se nesses índices, pode-se elaborar um sistema de acompanhamento das características de períodos de seca, assim como planejar medidas a serem tomadas de acordo com os valores mostrados pelos parâmetros.

O índice de precipitação padronizada (SPI) é um índice de seca meteorológica que foi desenvolvido por McKee, Doesken e Kleist (1993) com o objetivo de monitorar e analisar a seca, tendo ainda, capacidade de quantificar o *déficit* ou o excesso de precipitação em várias escalas temporais, destacando-se dentre os índices mais comuns utilizados no monitoramento de secas. A vantagem de sua utilização consiste na possibilidade de identificar qual região se encontra em situação mais crítica quanto às secas, sem necessitar de maiores informações acerca das condições climatológicas médias dessa região (SILVA, 2009).

O SPI utiliza apenas um tipo de informação, os dados mensais de precipitação. Segundo Hayes et al. (1999), esses dados devem ser normalizados de modo que os climas mais úmidos e secos sejam representados de uma maneira similar. Esse índice é largamente utilizado, pois de acordo com McKee et al. (1993), pode ser aplicado a qualquer região que possua uma série histórica de dados mensais de precipitação de, no mínimo, 30 anos.

Em Bonfim et al. (2021), os autores afirmam que o SPI representa a diferença entre a precipitação observada e a média do intervalo de tempo específico, ainda dividido pelo desvio padrão da amostra. O SPI é calculado ajustando uma função de densidade de probabilidade à distribuição de frequência da precipitação somada na escala de tempo de interesse. Neste estudo,

a função densidade de probabilidade que será utilizada é a gama (Equação 1), que será, posteriormente, transformada na distribuição normal padronizada.

$$g(x) = \frac{1}{\beta \alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} \quad \alpha = \frac{1}{4A} \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right) \quad \beta = \frac{\bar{x}}{\alpha} \quad (1)$$

Na qual:  $\alpha > 0$  parâmetro de forma;  $\beta > 0$  parâmetro de escala;  $x > 0$ , a quantidade de precipitação (mm) e  $\Gamma(\alpha)$  a função gama completa. Sendo, ainda,  $\bar{x}$  a precipitação média e  $A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum \ln(x)}{n}$ , onde  $\ln$  é o logaritmo neperiano e  $n$  é número de observações.

Com isso, a distribuição acumulativa será transformada em distribuição probabilidade normal, apresentando média igual a zero e desvio padrão igual a um. Posteriormente, a probabilidade acumulada de acontecimentos de cada valor mensal é estimada. Para que o valor do SPI seja encontrado, aplica-se a essa probabilidade, a função normal inversa. Dessa forma, segundo Santos et al. (2017), o valor do SPI será calculado de acordo com a Equação 2.

$$SPI = Zi = \frac{(Pi - \bar{Pi})}{\sigma_i} \quad (2)$$

Em que  $P_i$  é a precipitação mensal no período,  $\bar{P}_i$ , a precipitação média do período que será estudado e  $\sigma_i$  representa o desvio padrão da série histórica de precipitação.

Logo em seguida ao cálculo do SPI, a precipitação total mensal para um período de tempo específico receberá um valor adimensional equivalente a uma classe. Segundo Bonfim et al. (2021), SPI com valores positivos caracteriza superioridade à média de precipitação, enquanto valores negativos, descrevem eventos com números menores que a média de precipitação e o valor zero corresponde à precipitação média. Na Tabela 4 são ilustradas as categorias de SPI, de acordo com as descritas por McKee et al. (1993) e modificadas por Bonfim et al. (2021).

Tabela 4: Classificação do Índice de Precipitação Padronizada (SPI) e categorias.

| SPI           | CLASSIFICAÇÃO | SPI         | CLASSIFICAÇÃO  |
|---------------|---------------|-------------|----------------|
| < -2,00       | Seca Extrema  | 0,50 a 0,99 | Chuva Leve     |
| -1,99 a -1,50 | Seca Severa   | 1,00 a 1,49 | Chuva Moderada |
| -1,49 a -1,00 | Seca Moderada | 1,50 a 1,99 | Chuva Severa   |
| -0,99 a -0,49 | Seca Leve     | > 2,00      | Chuva Extrema  |
| -0,48 a 0,49  | Quase Normal  |             |                |

Fonte: MacKee et al. (1993) adaptada de Bonfim et al. (2021).

### 3.4 Tendência de precipitação e de níveis de reservatórios

A análise de tendências permite que sejam determinadas as regiões em que uma dada variável vem sofrendo modificações relevantes em seu comportamento no decorrer do tempo, investigando, dessa forma, as mudanças em seu desempenho. A identificação dessas regiões permite avaliar as prováveis consequências dessas mudanças nas atividades socioeconômicas, auxiliando nas tomadas de decisão a respeito dos riscos para a região.

Para a avaliação de tendências climáticas foi utilizado o teste estatístico não paramétrico de Mann-Kendall (MANN, 1945; KENDALL, 1975), o qual é indicado pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) para estabelecer se determinada série de dados possui uma tendência temporal de alteração estatisticamente significativa. A mesma considera que, na suposição de constância de uma série temporal, o sucedimento de valores ocorre de forma independente e a distribuição de probabilidade deve permanecer sempre a mesma, ou seja, série aleatória simples.

Segundo Goossens e Berger (1986), o teste de Mann-Kendall é o método mais apropriado para analisar a significância de possíveis mudanças climáticas em séries climatológicas, sendo amplamente usado, de acordo com Chattopadhyay e Edwards (2016), para avaliar tendências em séries temporais hidrológicas e climatológicas.

Neste estudo, o teste de Mann-Kendall foi utilizado para avaliar as tendências de precipitação e dos níveis de reservatório, para isso serão utilizados os dados de quatro postos pluviométricos e quatro postos fluviométricos, representativos de cada sub-região da BHSE. A estatística do teste está representada na Equação 3, sendo descrita em Silva et al. (2010).

$$S = \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} \text{sign}(x_i - x_j) \quad (3)$$

Em que S é o teste de Mann-Kendall,  $x_j$  são os dados estimados da sequência de valores, n é a quantidade de elementos da série temporal e o sinal  $(x_i - x_j)$  é igual a -1 para  $(x_i - x_j) < 0$ , 0 para  $(x_i - x_j) = 0$ , e 1 para  $(x_i - x_j) > 0$ .

Os níveis de significância de  $p = 0,01$  e  $0,05$  foram aplicados neste estudo, assim como Bonfim et al. (2021) procedeu. Uma estimativa não paramétrica para o valor da inclinação da tendência é obtida pela Equação 4, de acordo com Silva et al. (2010):

$$\beta = \text{Median} \left[ (x_j - x_i) / (j - i) \right], \text{ para } i < j \quad (4)$$

na qual,  $x_j$  e  $x_i$  são os pontos dados medidos no tempo  $j$  e  $i$ , respectivamente.

Além do teste de Mann-Kendall, também foi empregado o teste de significância de T-Student, com o intuito de verificar a significância estatística dos valores de tendência que serão encontrados.

O teste de significância de T-Student é considerado um dos testes mais utilizados em estudos meteorológicos (Kayano e Kousky, 1996; Da Silva, 2009), para verificar a significância das correlações encontradas. Essa distribuição pode ser calculada através da Equação 5:

$$tc = t / \sqrt{(n - 2) + t^2} \quad (5)$$

Em que,  $tc$  é o valor do percentil e  $c$  é o grau de liberdade,  $t$  é o valor do percentil tabelado de acordo com  $v$  ( $n-1$ ) e  $n$  é o número de dados. Foi utilizado o nível de significância de 95%.

### 3.5 Análise de Agrupamento

Dentre as técnicas que podem ser utilizadas para a análise do comportamento espacial da precipitação, existem as análises estatísticas de agrupamento. Uma dessas técnicas, utilizada para detecção e avaliação de regiões homogêneas, é conhecida como Cluster Analysis (Análise de Agrupamento). Esta análise faz parte de um conjunto de técnicas estatísticas denominada Análise Multivariada. Ela forma agrupamentos de dados com características semelhantes através da minimização da distância euclidiana entre os grupos (ALCÂNTARA, 2020).

Com os dados tratados e organizados, foi utilizado o método de Análise de Agrupamentos, e para isso, foi utilizado o *software* SPSS® e o método hierárquico. A partir desse *software*, dendrogramas foram gerados, os quais uniram os indivíduos mais semelhantes e apontaram os não semelhantes, por meio da distância euclidiana. Essa análise foi oportuna para identificar as áreas homogêneas climatologicamente.

Inicialmente, foi escolhida para análise da precipitação e do nível, uma estação por sub-bacia, sendo a estação representativa da sub-bacia, no entanto, para análise de agrupamentos, apenas essas estações não seriam suficientes para uma boa representação, então foram usadas outras estações com no mínimo 30 anos de dados nesta etapa, já que é necessário um maior número de estações para que a representação por dendrogramas seja coerente.

Para o ASF, acrescentaram-se as estações Barra do Rio de Janeiro, Vargem Bonita e Lassance. Para o MSF, foram utilizadas as estações Formosa do Rio Preto, Oliveira dos Brejinhos, Cabeceiras, Barreiro, Rio Preto, Lagoa dos Patos. Para representar o SMSF, selecionou-se adicionalmente, Serrita, Baixa Grande, Remanso, Lagoa Grande. Para o BSF, as estações Riacho Grande, Cacimbinhas, Mata Grande, Olho d'água das Flores, Pão de Açúcar, Porto da Folha, Canindé de São Francisco, Currallinho foram acrescentadas.

Todas essas estações acrescentadas (Tabela 5) seguiram os mesmos critérios utilizados na escolha das estações pioneiras, que foram a proximidade aos principais reservatórios de cada sub-região e pelo menos 30 anos de observações. No entanto, a quantidade de estações utilizadas na análise de agrupamento para cada sub-bacia não foi a mesma, mas isto não interfere nos resultados futuros.

Tabela 5: Postos pluviométricos acrescentados por sub-bacia.

| Sub-bacias              | Posto   | Estação                  | Latitude  | Longitude |
|-------------------------|---------|--------------------------|-----------|-----------|
| Alto São Francisco      | 1845027 | Barra do Rio de Janeiro  | -17,9581° | -45,1022° |
|                         | 2046003 | Vargem Bonita            | -20,3333  | -46,3667° |
|                         | 1744010 | Lassance                 | -17,89°   | -44,5767° |
| Médio São Francisco     | 1145001 | Formosa do Rio Preto     | -11,0478° | -45,2019° |
|                         | 1242008 | Oliveira dos Brejinhos   | -12,3161° | -42,8956° |
|                         | 442014  | Cabeceiras               | -4,5°     | -42,3333° |
|                         | 540039  | Barreiro                 | -5,1061°  | -40,0489° |
|                         | 2243270 | Rio Preto                | -22,0863° | -22,0863° |
|                         | 1644014 | Lagoa dos Patos          | -16,9833° | -44,6°    |
| Sub médio São Francisco | 737036  | São José do Egito        | -7,4667°  | -37,2833° |
|                         | 738029  | São José do Belmonte     | -7,8667°  | -38,7833° |
|                         | 738030  | Serra Talhada            | -7,9833°  | -38,3°    |
|                         | 638104  | Triunfo                  | -6,5767°  | -38,5972° |
|                         | 739023  | Exú                      | -7,5167°  | -39,7167° |
|                         | 739028  | Serrita                  | -7,9333°  | -39,3167° |
|                         | 1140018 | Baixa Grande             | -11,9606° | -40,1783° |
|                         | 942007  | Remanso                  | -9,6192°  | -42,0822° |
|                         | 840028  | Lagoa Grande             | -8,635°   | -40,239°  |
| Baixo São Francisco     | 937005  | Riacho Grande            | -9,4667°  | -37,4667° |
|                         | 937011  | Cacimbinhas              | -9,4°     | -37°      |
|                         | 937014  | Mata Grande              | -9,1333°  | -37,7333° |
|                         | 937016  | Olho D'Água das Flores   | -9,5333°  | -37,2833° |
|                         | 937018  | Pão de Açúcar            | -9,7486°  | -37,4497° |
|                         | 937026  | Porto da Folha           | -9,9167°  | -37,2667° |
|                         | 937028  | Canindé de São Francisco | -9,65°    | -37,8°    |
|                         | 937029  | Currallinho              | -9,7°     | -37,6667° |

Fonte: ANA (2022).

Identificadas as áreas semelhantes dentro da BHSF, foram gerados mapas pelo *Software Sufer®*, que permitirão uma rápida visualização de áreas climatologicamente semelhantes.

### 3.6 Análise de Ondaleta

A análise de Ondaleta (AO), também denominada de Ondeleta ou *Wavelet*, tem seu uso conveniente na verificação de escalas, em relação ao período de tempo que afetam os sistemas atmosféricos sobre a América do Sul e os oceanos adjacentes. É uma análise que mostra a estrutura temporal das séries temporais não estacionárias (DA SILVA, 2017).

O termo ondaleta estende-se a um conjunto de funções com forma de pequenas ondas geradas por dilatações e translações de uma função simples  $\psi(t)$  de variável real  $t$ , chamada por vezes de “ondaleta-mãe” e as funções derivadas dela são as chamadas “ondaletas filhas” (WENG E LAU, 1994; TORRENCE E COMPO, 1998 Apud DA SILVA, 2017).

Uma das ondaletas contínuas mais comuns é a Ondaleta Morlet. Ela é considerada complexa já que possui características semelhantes às de sinais meteorológicos, tais como simetria ou assimetria, e variação temporal brusca ou suave. Em conformidade com a literatura, este é um critério para a escolha da função Ondaleta (Weng e Lau, 1994; Morettin, 1999), usado por Abreu Sá et al. (1998); Moraes e Abreu Sá (2006); Moura e Vitorino (2012); Da Silva e Galvêncio (2013); Silva (2015) e Da Silva (2017).

A ondaleta de Morlet é uma exponencial complexa modulada por uma Gaussiana (Andreoli et al., 2004 Apud Da Silva, 2017) e é dada pela seguinte expressão (Equação 6):

$$\varphi(t) = e^{i\omega_0\eta}e^{-\eta^2/2} \quad (6)$$

Em que  $\varphi(t)$  é a ondeleta de Morlet,  $\eta = t/s$ , sendo  $t$  o tempo,  $s$  é a escala da ondaleta em função do tempo ( $= 2/dt$ ) e  $\omega_0$  é uma frequência não-dimensional ( $\text{lag1} = 0,7$ ), escolhidos conforme Andreoli et al. (2004). Todos esses parâmetros serão introduzidos no “script” de programação do *software* Matlab® e então o período de anos dos ciclos e a escala temporal dominante serão obtidos por este mesmo Software, a partir de comandos específicos.

De acordo com DA SILVA (2017), a análise de ondaleta (AO) depende do intervalo de tempo usado nas observações, em outros termos, a AO não consegue ilustrar variabilidade intramensal, sendo os dados totais ou médias mensais.

Dessa maneira, as séries de dados de precipitação e níveis de reservatório para cada sub-bacia serão submetidas à AO, para todo o período de dados e o maior possível, podendo ser de períodos distintos entre as sub-bacias, com intuito de identificar ciclos ou oscilações, que poderão fornecer uma indicação lúcida de qual escala temporal rege os sistemas ou fenômenos meteorológicos ao longo das séries durante as diferentes configurações atmosféricas de grande escala.

## 4. RESULTADOS

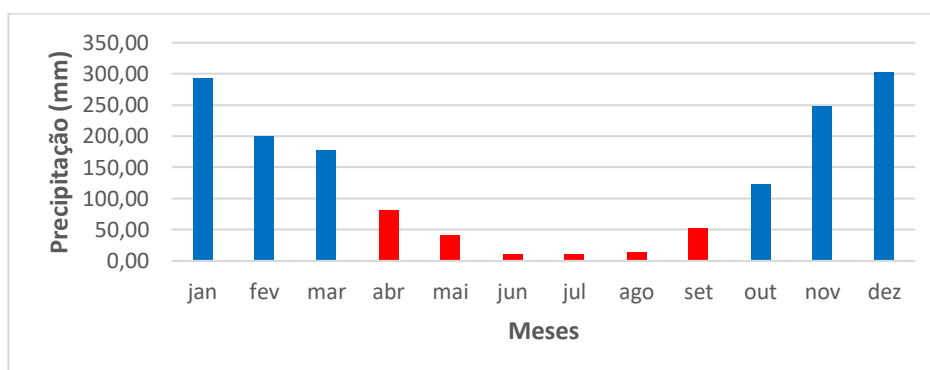
### 4.1 Análise Climática

Nas Figuras 6, 7, 8 e 9 são apresentadas as médias climatológicas das quatro sub-regiões da BHSF, compreendendo o período entre 1968 e 2020, em que a cor azul indica os meses chuvosos e a cor vermelha, os meses de seca. As sub-regiões ASF, MSF e SMSF apontaram comportamentos similares em relação aos períodos secos. Já a sub-região do BSF procedeu de forma distinta das demais regiões.

Por causa de sua grande extensão e localização geográfica, o comportamento climático da BHSF é bem variável. Da Silva (2004) relata que esse comportamento se dá em virtude da intensa influência de diversos fenômenos atmosféricos que interferem no regime de precipitação na Bacia. Em seu trabalho, Assis (2016) constatou essa característica na mesma região de estudo.

Para sub-região do ASF (Figura 6), os seis meses mais secos verificam-se de abril a setembro, com precipitações mínimas nos meses de junho e julho, e a quadra chuvosa ocorre de novembro a fevereiro devido à atuação da ZCAS.

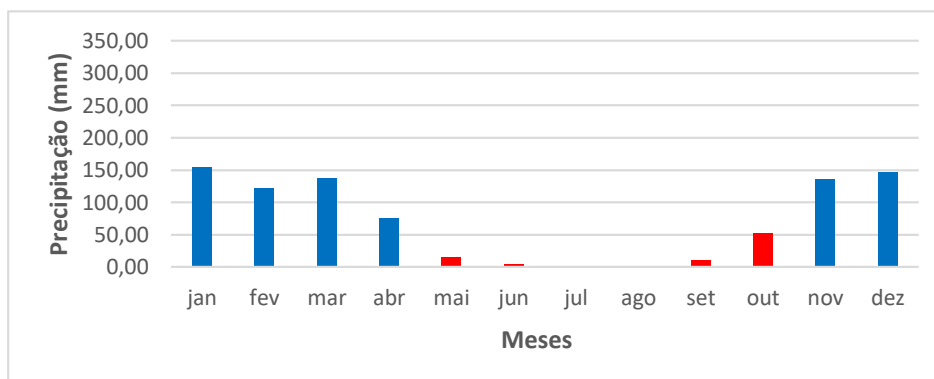
Figura 6: Média climatológica para o ASF de 1968 a 2020.



Fonte: Autor (2021).

Para a sub-região do MSF (Figura 7), verifica-se que os seis meses mais secos vão de maio a outubro e os meses de julho e agosto apresentam as menores precipitações, quase com ausência destas, e sua quadra chuvosa transcorre de dezembro a março.

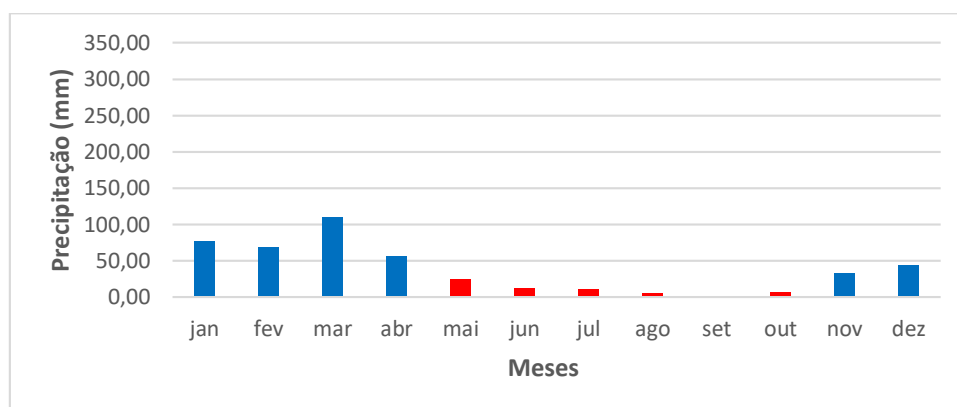
Figura 7: Média climatológica para o MSF de 1968 a 2020.



Fonte: Autor (2021).

Na sub-região do SMSF (Figura 8), que se encontra no NEB, em geral, os seis meses mais secos, assim como MSF, verificam-se entre maio e outubro, com precipitações mínimas nos meses de agosto e setembro, e a quadra chuvosa ocorre de janeiro a abril, contando com a influência da aproximação da ZCIT.

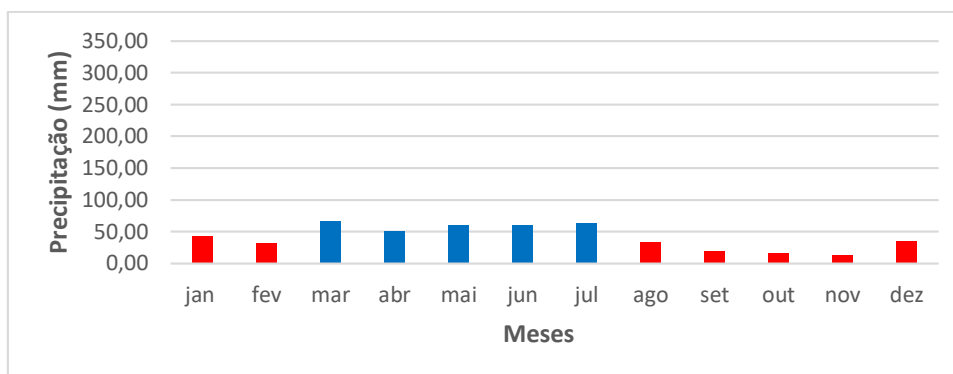
Figura 8: Média climatológica para o SMSF de 1968 a 2020.



Fonte: Autor (2021).

Já na sub-região do BSF (Figura 9), observa-se um comportamento diferente das demais. Nela, o período seco compreende o intervalo de agosto a fevereiro, com precipitação mínima nos meses de outubro e novembro, e o período chuvoso ocorre entre os meses de março e julho, sendo março e maio os meses com maiores valores de precipitação.

Figura 9: Média climatológica para o BSF de 1968 a 2020.



Fonte: Autor (2021).

Para Aragão (1975), os grandes responsáveis pelo estímulo ou inibição da precipitação sobre o NEB são os efeitos dinâmicos. Ele afirma que em março ocorre divergência de massa nos baixos níveis, convergência nos níveis médios associada ao movimento vertical descendente, e dessa forma, favorece a inibição da precipitação.

Ainda segundo Aragão (1975), mesmo durante os períodos de seca no NEB, nos baixos níveis atmosféricos, a umidade presente é suficiente, porém não é possível verificar um mecanismo dinâmico capaz de provocar movimentos ascendentes que formem nuvens desenvolvidas o suficiente para produzir precipitação.

Molion e Bernardo (2002) apontaram que, nas escalas espacial e temporal, a variabilidade interanual da distribuição da precipitação sobre o NEB, apresenta-se intimamente relacionada às mudanças de aspecto da circulação atmosférica de grande escala e, também, com a interação oceano-atmosfera no Pacífico e no Atlântico.

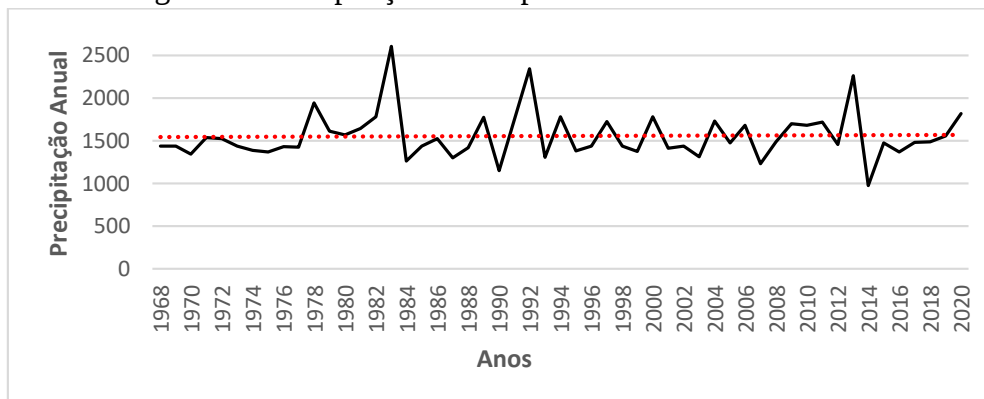
As sub-regiões mostram configurações de chuva distintas em virtude dos diferentes sistemas e fenômenos meteorológicos atuantes em cada uma delas. De acordo com Da Silva (2008), as razões de ordem física da variabilidade de chuva sobre essas regiões são complexas e estão relacionadas com a circulação atmosférica global.

#### 4.2 Precipitação Anual e Cota Média Anual

As Figuras 10, 12, 14 e 16 ilustram a precipitação anual das quatro sub-regiões da BHSF, compreendendo o período entre 1968 e 2020. Nas Figuras 11, 13, 15 e 17 são mostrados os valores para cota média anual, no período de 1968 a 2020 para ASF, MSF e BSF, e no período de 1972 a 2020 para SMSF. O período de tempo diferente para o SMSF correu devido à ausência de dados anteriores a 1972 no banco de dados da ANA para essa sub-região. As linhas pontilhadas em vermelho em cada gráfico indicam as tendências de comportamento das variáveis.

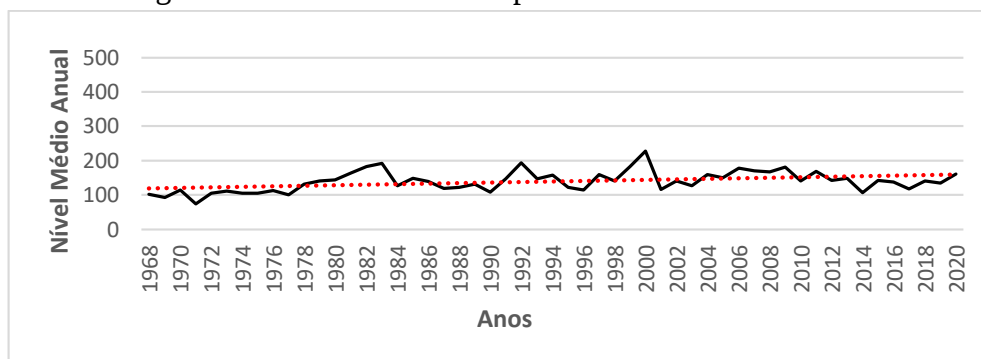
Para o ASF (Figura 10), os picos mais pronunciados de precipitação anual ocorreram nos anos de 1983, 1992 e 2013. Analisando o gráfico da cota (Figura 11), percebe-se que também apresenta três picos, nos anos de 1983, 1992 e 2000.

Figura 10: Precipitação Anual para o ASF de 1968 a 2020.



Fonte: Autor (2021).

Figura 11: Cota Média Anual para o ASF de 1968 a 2020.



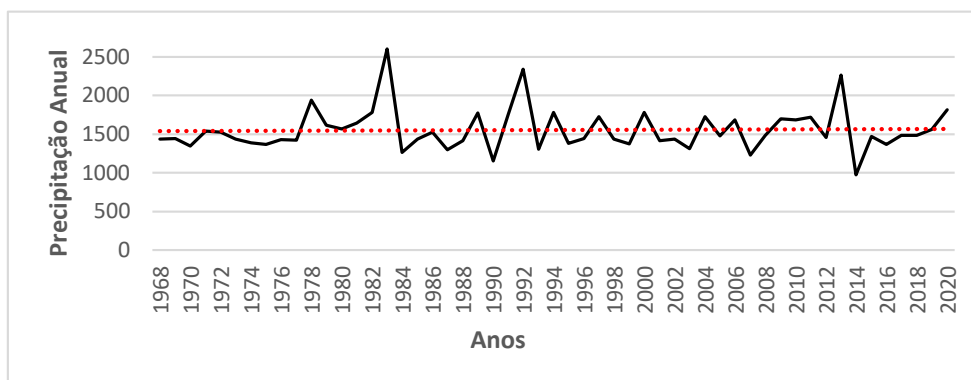
Fonte: Autor (2021).

A linha de tendência do gráfico da Figura 10 exhibe um discreto aumento, o que indica um provável aumento das precipitações anuais nessa região ao longo do tempo, já a linha de tendência da Figura 11 mostra um aumento mais acentuado nos níveis ao longo do tempo.

Ainda na Figura 10, destaca-se um pronunciado pico negativo entre os anos de 2015 e 2016, no qual a precipitação anual foi a menor da série histórica. Esse biênio coincide com uma ocorrência do El Niño de intensidade forte, de acordo com os registros do CPTEC/INPE (2021).

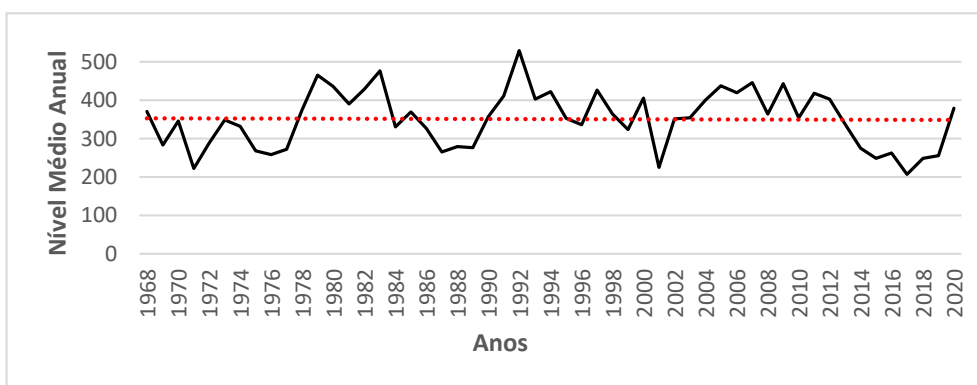
As Figuras 12 e 13, referentes ao MSF, mostram comportamento semelhante ao da sub-região do ASF em relação aos picos e vales para as duas variáveis, no entanto as linhas de tendência comportam-se de forma diferente. A linha de tendência exhibe decréscimo, prevendo redução nos valores de precipitação anual. Ainda assim, a linha de tendência do gráfico de cota apresenta-se praticamente estacionária, indicando uma possível estabilidade dos valores de cota.

Figura 12: Precipitação Anual para o MSF de 1968 a 2020.



Fonte: Autor (2021).

Figura 13: Cota Média Anual para o MSF de 1968 a 2020.



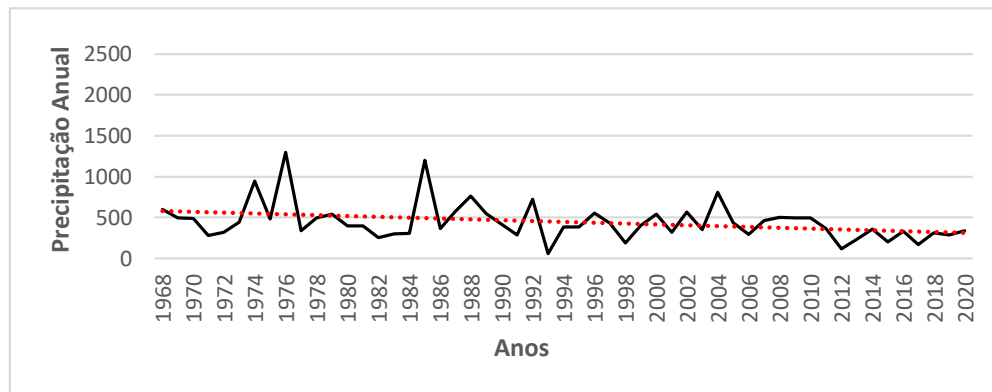
Fonte: Autor (2021).

Dentre os grandes picos negativos da série histórica de precipitação anual dessa sub-região os anos de 1984 e 1990 (Figura 12), indicaram períodos de secas intensas. Esse episódio também foi observado por Santos (2009), no qual observou um período de seca nesse mesmo intervalo de tempo e que foi seguido por um período chuvoso até o início de 1992.

Galvêncio (2002) verificou que em anos em que ocorre El Niño, as chuvas aparecem com aumento significativo no MSF, fato confirmado por um pico de precipitação entre os anos de 1983 e 1984 (Figura 12), mesmo período em que houve registro de El Niño forte no biênio 82-83 (CPTEC/INPE, 2021). Essa influência do ENOS sobre a BHSF também foi comprovada no estudo de Da Silva (2015).

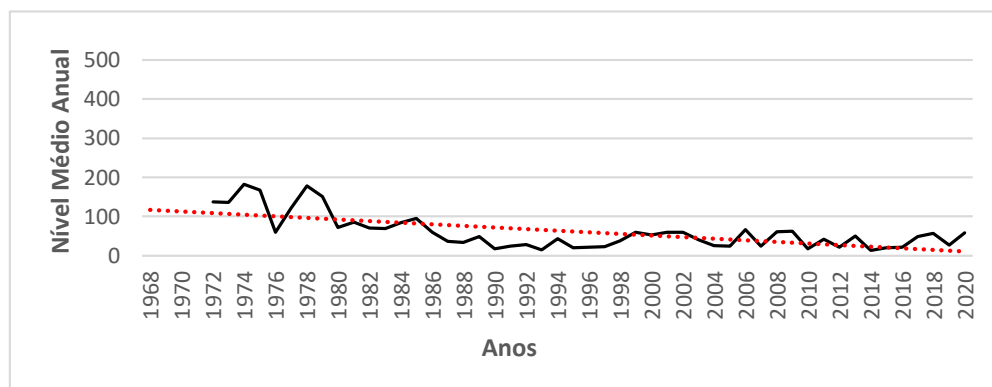
Já para a sub-região do SMSF, nas Figuras 14 e 15, têm-se dois grandes picos, tanto no gráfico de precipitação quanto no de cota, para o primeiro, nos anos de 1976 e 1985, e para o segundo, nos anos 1974 e 1978. Pode-se notar que o gráfico da Figura 15 inicia em 1972, pois antes desse ano os dados de nível da estação analisada não estavam disponíveis.

Figura 14: Precipitação Anual para o SMSF de 1968 a 2020.



Fonte: Autor (2021).

Figura 15: Cota Média Anual para o SMSF de 1972 a 2020.



Fonte: Autor (2021).

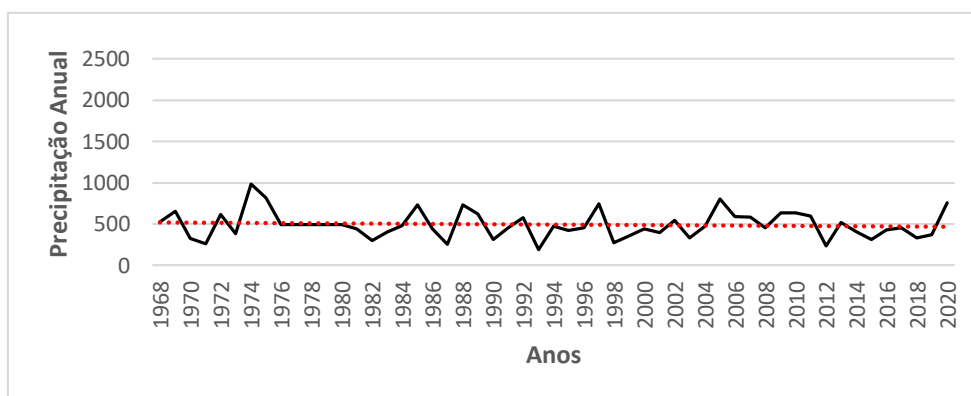
A linha de tendência para a precipitação anual está decrescente, apontando redução dos totais anuais e a linha de tendência para a cota está também decrescente, porém mais acentuada, com uma maior inclinação.

Da Silva et al (2011) observaram, através do Índice de Anomalia de Chuva (IAC), que o SMSF apresenta alta variabilidade entre anos secos e chuvosos. Essa característica pode ser visualizada na Figura 14, na qual é perceptível a alternância entre picos positivos e negativos nessa sub-região.

Assis (2018) concluiu que tanto o Oceano Atlântico Tropical Norte quanto o Tropical Sul influenciam no comportamento das chuvas no SMSF, sobretudo quando o Oceano Atlântico Tropical Norte apresenta aquecimento maior que o Sul, induzindo a ZCIT ao se posicionar mais a norte da linha do Equador, provocando redução da precipitação.

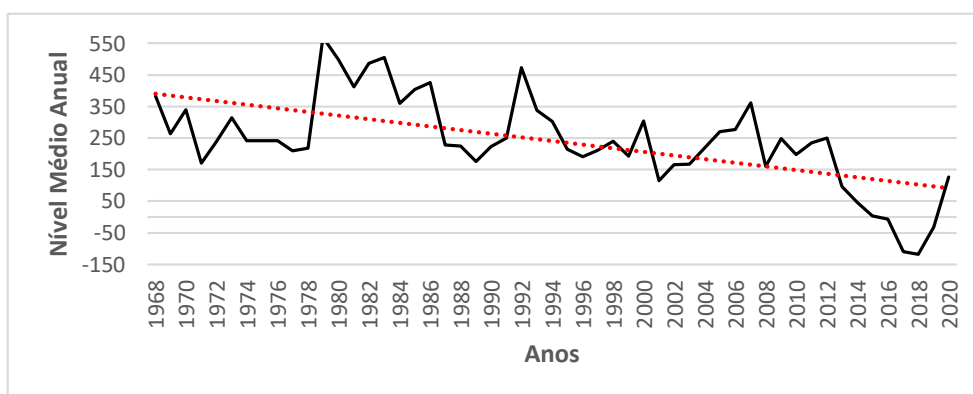
No caso do BSF, verifica-se um pico de precipitação (Figura 16) no ano de 1974, ano de La Niña moderada e, segundo os estudos de Da Silva (2013), interferência da ODP fria. A linha de tendência desse gráfico está praticamente linear, apenas uma leve inclinação negativa. No gráfico de cota (Figura 17), a linha de tendência mostra-se bem mais inclinada, indicando prováveis diminuições nos níveis dos rios. Além disso, nota-se um vale bastante acentuado no ano de 2018, no qual a cota média chegou a um valor abaixo de -100 mm.

Figura 16: Precipitação Anual para o BSF de 1968 a 2020.



Fonte: Autor (2021).

Figura 17: Cota Média Anual para o BSF de 1968 a 2020.



Fonte: Autor (2021).

Em Alves (2012), tem-se que a variabilidade interanual no NEB é afetada pelo ciclo do fenômeno ENOS e as fases do dipolo de TSM no Atlântico Tropical, evidenciando decréscimo de precipitação em regiões com no BSF. Essa variabilidade pode ser notada nas Figuras 16 e 17, através dos consecutivos picos positivos e negativos, tanto de precipitação quanto de cota.

Nessa sub-região, o déficit hídrico é recorrente como, inclusive, mostraram os estudos de Santos et al (2009) e Sun et al (2016). Assim como foi visto para o SMSF, na Figura 16 também

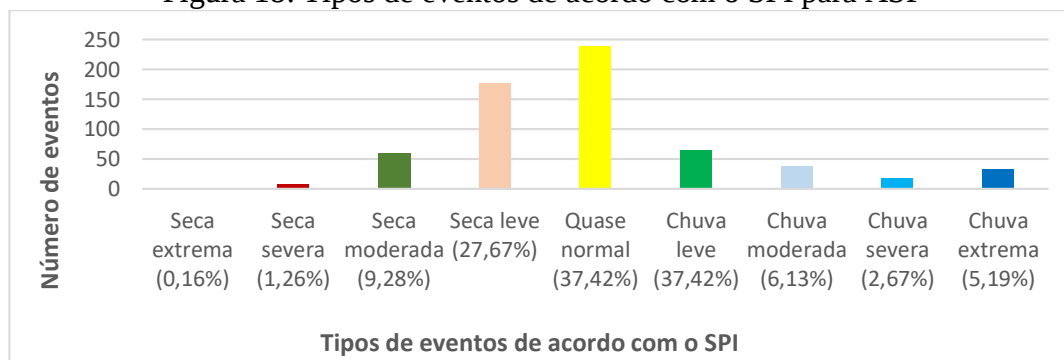
é possível verificar um pico negativo entre os anos de 1992 e 1994, indicando a ausência de sistemas atuantes.

#### 4.3 Tipos de eventos de acordo com o SPI

Diversos trabalhos já foram realizados com a finalidade de classificar eventos extremos secos e chuvosos através do SPI, em diferentes lugares do Brasil, como: Paraíba (MACEDO et al.,2010); Piauí (GUEDES et al.,2012); Piracicaba-SP (SANGIOLO, 2014); Espírito Santo (ULIANA et al., 2015); Bahia (Sousa et al.,2016); Amazônia (SANTOS et al.,2017); São Paulo (BONFIM & DA SILVA, 2018) e (BONFIM et al.,2021). Em todos esses estudos, os autores corroboram com a afirmativa de que o SPI é uma ferramenta valiosa na verificação de eventos extremos de chuvas e secas.

Para o ASF, como mostrado na Figura 18, a análise de distribuição dos tipos de eventos de acordo com o SPI foi averiguada apenas uma ocorrência de seca extrema, ocorrida em dezembro de 2012, ano em que não houve registro de El Niño, podendo ter influenciado os eventos de seca, sendo a única das sub-regiões a apresentar esse tipo de evento. A maioria dos casos foi classificada como quase normal (37,42 %) e uma parcela considerável dos eventos foi de seca leve (27,67 %).

Figura 18: Tipos de eventos de acordo com o SPI para ASF



Fonte: Autor (2021).

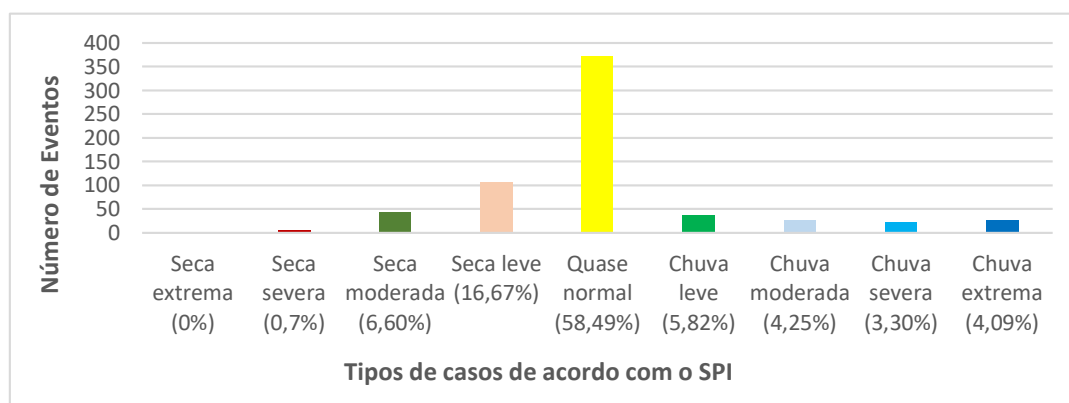
Essa sub-região destaca-se também por apresentar o maior percentual de ocorrências de secas severas. A de maior intensidade ocorreu em 1970, ano de El Niño moderado, indo ao encontro com o que foi identificado por Macedo et al. (2010) em estudos na cidade de Coremas (PB), onde foi observado que a seca severa registrada em 1995 estava relacionada com o El Niño moderado.

Os eventos de chuva dessa sub-região destacam-se em relação às demais, compreendendo um total de 51,41 % dos eventos de acordo com o SPI. Entre os episódios de chuva extrema, a maior ocorreu no ano de 1983, no qual foi verificado El Niño forte. No entanto, é a segunda sub-

região de mais caso de seca leve, o que demanda atenção em relação a constância dos anos de seca, mesmo que de intensidade leve.

Na análise de distribuição de eventos conforme o SPI para o MSF (Figura 19), observou-se que na maioria dos casos (58,49 %) os anos foram classificados como quase normal, ocorrendo poucos episódios de seca severa (0,7 %) e seca moderada (6,60 %) e a maior seca ocorreu em novembro de 1971, neste ano também não houve registro de El Niño. Nesta região de estudo, não foi observada ocorrência de seca extrema no período de tempo analisado.

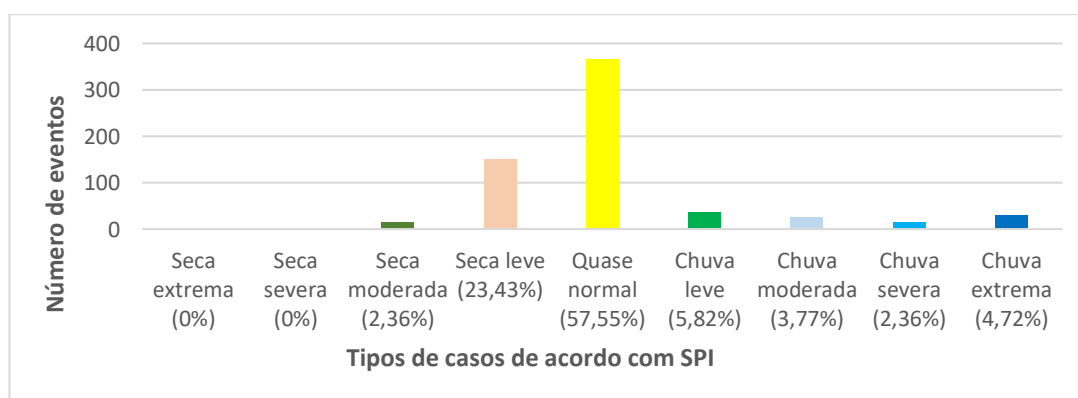
Figura 19: Tipos de eventos de acordo com o SPI para MSF.



Fonte: Autor (2021).

Após o cálculo do SPI para o SMSF (Figura 20), foi verificado, como nas demais sub-regiões, que a maior parte dos eventos se enquadrou como quase normal (57,55 %) e a quantidade total de secas representou 25,79 % dos eventos. As maiores secas foram verificadas no mês de março de dois anos, 1993 e 2013. No primeiro ano, observou-se um El Niño de intensidade fraca e no segundo, não houve registro do fenômeno.

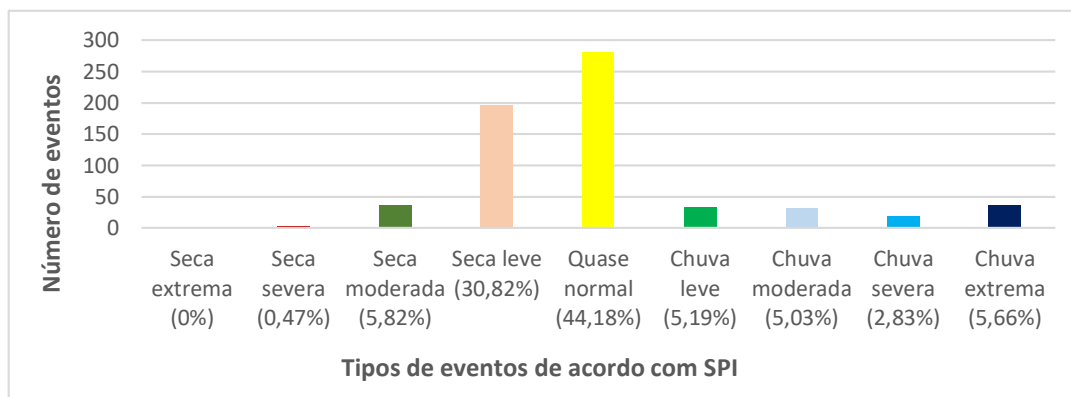
Figura 20: Tipos de eventos de acordo com o SPI para SMSF.



Fonte: Autor (2021).

Já no BSF (Figura 21), apenas 44,18 % dos eventos foram quase normais, e 37,11 % classificados como secas, sendo a maioria das secas registrada como seca leve (30,82 %), o maior percentual para esse evento entre as quatro sub-regiões, e a seca mais severa ocorreu em agosto de 1991, ano em que teve um forte El Niño.

Figura 21: Tipos de eventos de acordo com o SPI para BSF.



Fonte: Autor (2021).

Apesar de ter sido a sub-região de maior número de casos de secas leves, também foi a região que registrou o maior número de casos de chuva extrema entre as áreas estudadas. A maior chuva ocorreu no ano de 1974, no qual foi registrado um fenômeno La Niña moderado, podendo ter influenciado os eventos de chuva extrema.

Essas evidências corroboram com Bonfim et al. (2021), no qual foi constatado que os eventos de seca nas Bacias Hidrográficas do estudo apresentaram uma maior frequência, contudo, a ocorrência de eventos chuvosos também se mostrou de forma intensa.

Os resultados mostram que na classificação dos eventos de seca para as quatro sub-regiões da BHSE, através da aplicação do índice de SPI, os eventos quase normais foram os mais recorrentes, representando 37,42 % dos eventos para o ASF (Figura 18), 58,49 % para o MSF (Figura 19), 57,55 % para o SMSF (Figura 20) e 44,18 % para o BSF (Figura 21). Já os eventos de seca extrema não tiveram expressividade no período de tempo estudado.

Em geral, as ocorrências de secas leves e secas moderadas foram maiores que as de chuvas leves e chuvas moderadas. Essa característica revela a persistência de secas com intensidade leve, demandando uma atenção especial por parte dos gestores, uma vez que, os eventos menos intensos de seca podem vir a se desenvolver em eventos mais intensos, com a ajuda de fenômenos externos, como mencionado em Nascimento et al. (2017), contribuindo com uma provável deterioração do setor hídrico.

Foi ainda possível constatar que os eventos de seca extrema foram menos recorrentes que os de chuva extrema, conforme Santos et al. (2017) que também constatou em seu trabalho. Os casos extremos de seca aconteceram apenas no ASF, correspondendo a 0,16 % dos eventos nessa sub-região. Já os eventos de chuva extrema, ocorreram em todas as sub-regiões, sendo em maior quantidade no BSF, representando 5,66 % dos eventos.

#### 4.4 Tendências climáticas em precipitação e cotas

As tendências anual e da série para as quatro sub-regiões, referentes às duas variáveis, foram calculadas e dispostas na Tabela 6, para o mesmo período de tempo. Verifica-se que os totais anuais das precipitações e das cotas apresentaram tendências positivas e negativas, no entanto, as negativas predominaram.

Tabela 6: Tendência Anual e da Série para as quatro sub-regiões da BHSF.

|             | Tendência Anual   |              | Tendência Série   |              |
|-------------|-------------------|--------------|-------------------|--------------|
|             | Precipitação (mm) | Cota (cm)    | Precipitação (mm) | Cota (cm)    |
| <b>ASF</b>  | 0,559309341       | 0,79162444   | 29,64339506       | 41,95609533  |
| <b>MSF</b>  | -2,612843649      | -0,08181149  | -138,4807134      | -4,336008973 |
| <b>SMSF</b> | -5,042846957      | -2,026478849 | -267,2708887      | -107,403379  |
| <b>BSF</b>  | -0,992861985      | -5,780867521 | -52,62168519      | -306,3859786 |

Fonte: Autor (2021).

Tabela 7: Status da tendência e Teste T-Student, o qual mostra as sub-regiões que apresentaram significância estatística ao nível de 95%.

|             | Status da tendência |            | Teste T-Student   |                   |
|-------------|---------------------|------------|-------------------|-------------------|
|             | Precipitação (mm)   | Cota (cm)  | Precipitação (mm) | Cota (cm)         |
| <b>ASF</b>  | Aumento             | Aumento    | Com Significância | Com Significância |
| <b>MSF</b>  | Diminuição          | Diminuição | Sem Significância | Sem Significância |
| <b>SMSF</b> | Diminuição          | Diminuição | Sem Significância | Sem Significância |
| <b>BSF</b>  | Diminuição          | Diminuição | Sem Significância | Sem Significância |

Fonte: Autor (2021).

As análises de tendências (Tabela 7) realizadas, utilizando o teste de Mann-Kendall, indicaram que nos 52 anos de dados as sub-regiões MSF, SMSF e BSF apresentaram tendência de diminuição na série de precipitação e de cota, já o ASF apresentou tendência de aumento na série de precipitação e de cota. Através do teste de T-Student (Tabela 7), verificou-se que MSF, SMSF e BSF não tiveram significância estatística para a tendência das duas variáveis, no entanto, o ASF, mostrou-se significativo estatisticamente tanto para precipitação quanto para cota.

As maiores tendências de diminuição ocorreram no MSF e no SMSF e as tendências de aumento foram constatadas apenas no ASF, tanto para precipitação como para cota. Essa tendência de aumento de precipitação no ASF é um fato positivo, sobretudo para a agricultura e os setores ligados aos recursos hídricos. No entanto, as demais sub-regiões merecem atenção especial, já que o comportamento mostrou tendências de diminuição das variáveis.

Deve-se ter atenção aos valores de aumento e diminuição ocorridos no período. Um fator agravante é que existe também o efeito antrópico sobre os recursos hídricos, como assoreamento, poluição e destruição das matas ciliares, que contribuem na degradação dos corpos hídricos, colocando em risco a sustentabilidade dos recursos naturais locais, conforme De Sousa (2013) pontua em seu trabalho.

Diferentes autores encontraram tendências climáticas de aumento e diminuição em regiões do NEB. Da Silva (2016) localizou tendência de diminuição de precipitação para três macrorregiões do Ceará e tendência de aumento para outras cinco macrorregiões. Costa et al. (2015) identificaram na região semiárida do NEB que houve tendência negativa nos meses de outubro a dezembro e positiva de junho a agosto, para precipitação.

Tendência de diminuição de precipitação pôde ser observada por Da Silva e Silva (2011) no Cariri cearense e na Região Metropolitana de Fortaleza. Rusticucci e Penalba (2000) também encontraram tendências de diminuição, porém no Chile. Já Haylock et al. (2006) conseguiram encontrar tendências de aumento no NEB e Santos e Brito (2007) na Paraíba e no Rio Grande do Norte.

#### 4.5 Análise de Ondaletas

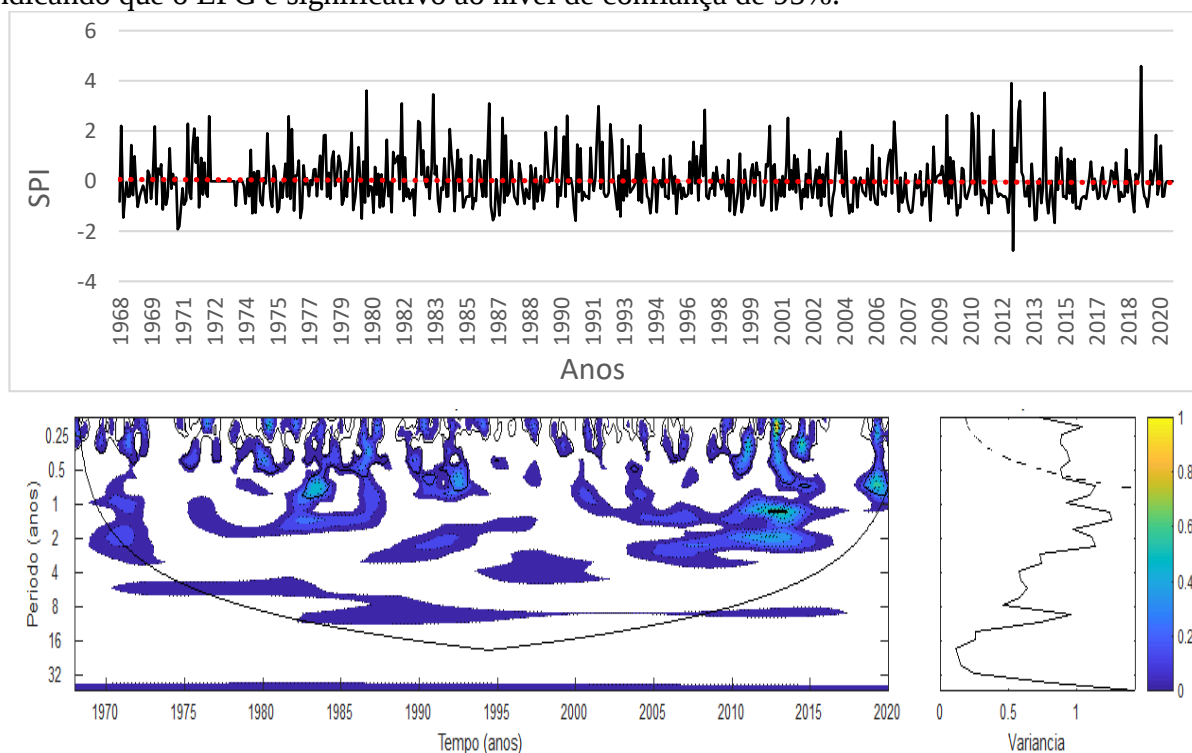
As séries de precipitação de cada uma das sub-regiões foram sujeitas às análises de ondaletas com a finalidade de detectar as diferentes escalas temporais na série de dados, como períodos cíclicos, variações sazonais e interanuais, e variações aleatórias. As análises preliminares

de ondaletas fornecem uma indicação mais clara de qual escala temporal domina os sistemas meteorológicos ao longo das séries de SPI.

A presença das escalas temporais semestral e anual foi observada em todas as sub-regiões, podendo estar associada ao ciclo anual dos sistemas acoplados oceano-atmosfera atuantes na região. Também foram observadas escalas de 7 a 8 anos, relacionadas com eventos ENOS estendido e Dipolo do Atlântico (CLAUZET E WAINER, 1999), além da escala de 11 anos, ligada ao ciclo de Manchas solares, mas que também pode estar associado à variabilidade do Dipolo do Atlântico (KERR, 1996 E MOLION, 2005).

Através da análise da série temporal de SPI para o ASF (Figura 22a), pode-se identificar os anos secos e chuvosos. O ano de destaque, no qual se deu o maior pico negativo, foi 2012, quando houve uma seca extrema. Além do ano de 2012, pode-se evidenciar os anos de 1970, 1971, 1986, 1990, 2008, 2014 e 2015, quando ocorreram secas classificadas como severas. Essas ocorrências de anos com secas extrema e severa na série de precipitação prejudicaram os níveis dos reservatórios ao longo da BHSF, como nos anos de 1969 e 1971, quando foram registrados os menores valores de nível para essa sub-região, no período de tempo analisado.

Figura 22: a) Série temporal do SPI para o ASF; b) Espectro de potência de ondaleta (EPO) para SPI do ASF. A curva em forma de U representa o cone de influência, sob a qual o efeito de borda é importante; c) Espectro de potência global (EPG), com o contorno tracejado indicando que o EPG é significativo ao nível de confiança de 95%.



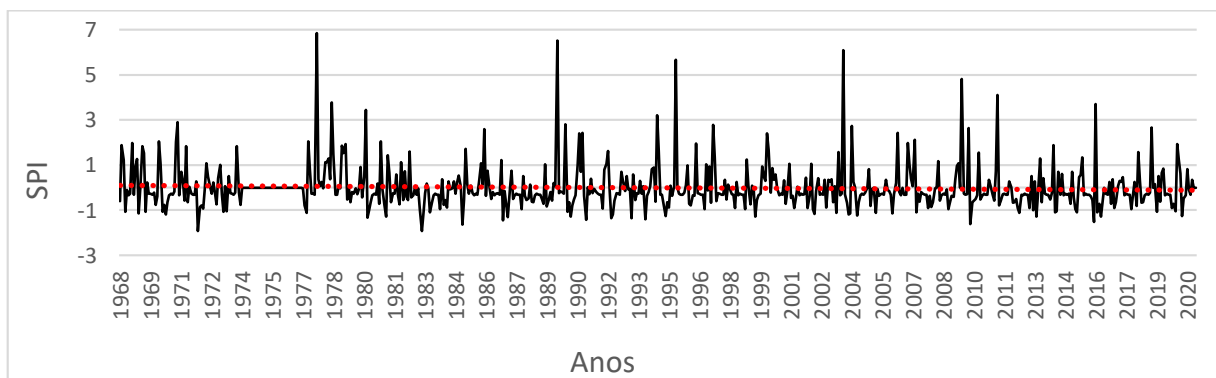
Fonte: Autor (2021).

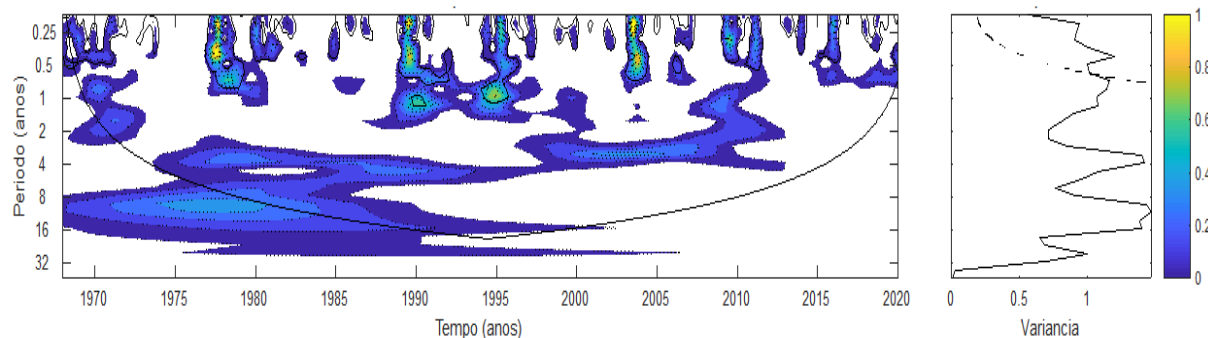
Para o ASF, os maiores índices negativos foram registrados entre 2012 e 2013, propondo-se que esse período tenha sido marcado por um episódio de seca anômalo. Possivelmente essa seca extrema se deu pela baixa atuação conjunta de fenômenos meteorológicos de diferentes escalas temporais, resultando em uma redução significativa nas vazões afluentes aos reservatórios da região, o que impacta na manutenção dos usos mais prioritários dos recursos hídricos. As escalas que aparecem com mais significância são a sazonal e a interanual (Figura 22b). No entanto, a escala de 32 anos apresenta a maior dominância no período de tempo estudado (Figura 22c), mesmo não tendo significância.

Para essa sub-região, as escalas que se mostraram mais persistentes na maior parte do período foram a escala de 7 anos referente aos fenômenos ENOS e Dipolo do Atlântico, a escala de 11 anos, ligada ao ciclo de manchas solares também foi vista, corroborando com Costa et al. (2016) e a escala de 32 anos, no entanto, sem significância. Em conformidade com Clauzet e Wainer (1999) a escala de 7 anos também está associada ao Dipolo do Atlântico e ao sinal persistente do ENOS.

A sub-região MSF apresentou escala dominante 11 anos (Figura 22c), que foi associado ao ciclo de manchas solares, segundo Kerr (1996) e a associação das escalas interanuais, ligada ao ENOS. As escalas de maior significância estatística foram a sazonal e interanual, ocorrendo em vários períodos ao longo de toda a série. A união das escalas temporais com períodos diferentes resultou em altos índices de precipitação na região nos anos de 1977, 1989, 1995, 2003, 2009 (Figura 22a), colaborando para o aumento dos níveis dos reservatórios nesses anos.

Figura 23: a) Série temporal do SPI para o MSF; b) Espectro de potência de ondaleta (EPO) para SPI do MSF. A curva em forma de U representa o cone de influência, sob a qual o efeito de borda é importante; c) Espectro de potência global (EPG), com o contorno tracejado indicando que o EPG é significativo ao nível de confiança de 95%.





Fonte: Autor (2021).

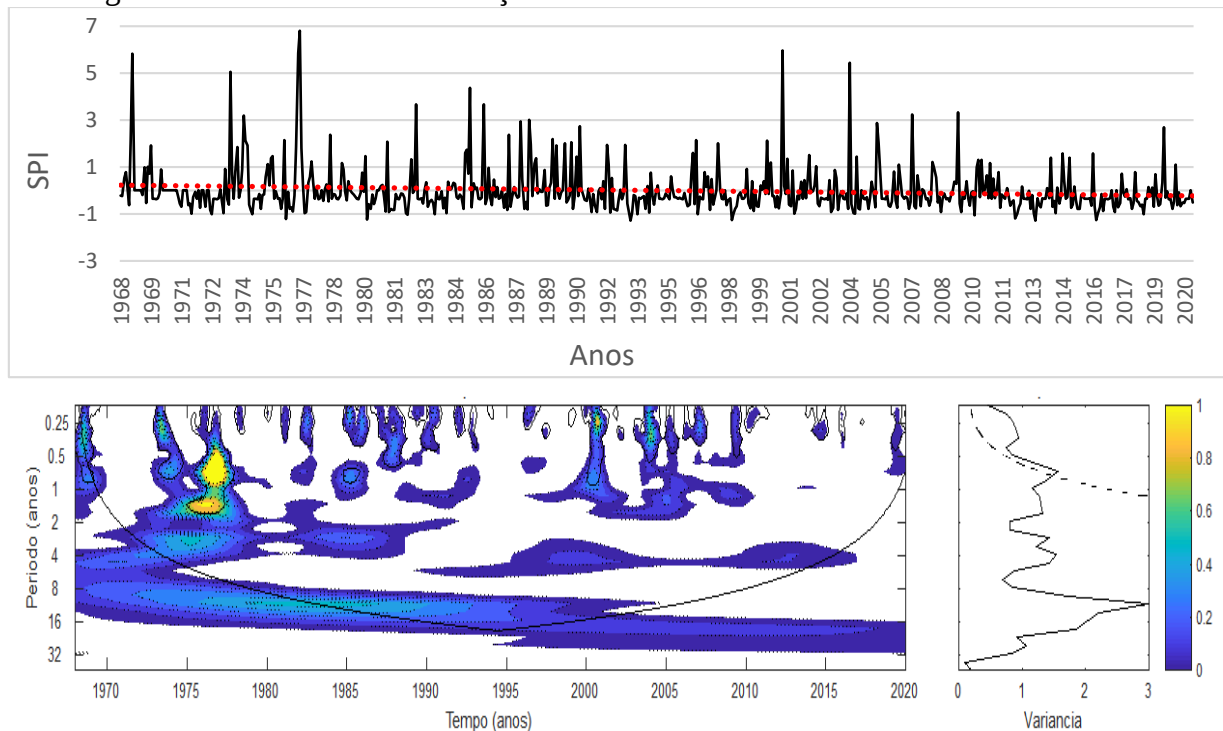
Outra escala dominante, porém sem significância, é a de 21 anos (Figura 23b e 23c). De acordo com Da Silva (2003), períodos de aproximadamente 21 anos podem estar relacionados com ciclos de atividade solar, variações da atração gravitacional entre Terra-Sol-Lua ou variações internas do sistema. Segundo Dos Santos (2014), a ODP influencia as precipitações e consequentemente, o nível dos reservatórios.

Nesta área de estudo, observou-se proeminentes picos positivos, o maior deles no ano de 1977, ano em que foi registrado El Niño moderado. E a maior seca do período analisado foi em 1971, com intensidade de -1,925, ano de fenômeno La Niña fraco. No entanto, o ano de nível mais baixo registrado no reservatório dessa sub-região foi o de 2017, com a marca de 206,83 mm, quando estava em atuação um episódio moderado de La Niña.

Verifica-se no período entre 1974 a 1976 uma falha em decorrência do preenchimento dos dados de precipitação, já que não havia registro no banco de dados da ANA, por isso não é possível visualizar anomalias para mais ou para menos na série temporal do SPI para o MSF (Figura 23a).

Já no SMSF, a escala de 16 anos apresentou-se como dominante e durante o período de 1976 a 2015 (Figura 24b), mostrou-se significativa estatisticamente. Destaca-se a forte significância estatística das escalas sazonal e interanual, sobretudo entre os anos de 1975 e 1990. A junção da ocorrência de sistemas e fenômenos meteorológicos de escalas diferentes influenciou a precipitação e aumentando os valores de precipitação nesse intervalo de anos.

Figura 24: a) Série temporal do SPI para o SMSF; b) Espectro de potência de ondaleta (EPO) para SPI do SMSF. A curva em forma de U representa o cone de influência, sob a qual o efeito de borda é importante; c) Espectro de potência global (EPG), com o contorno tracejado indicando que o EPG é significativo ao nível de confiança de 95%.



Fonte: Autor (2021).

Nos anos de 1974, 1976 e 1985, principalmente, houve intensificação nos totais pluviométricos sobre o SMSF (Figura 12), aumentando também os níveis dos reservatórios nesses anos, nos quais os maiores valores de cota registrados foram nos anos de 1974 e 1978. Em contrapartida, os anos subsequentes sofreram com os baixos níveis de reservatório, podendo prejudicar o fornecimento dos recursos hídricos em toda a extensão da Bacia, especialmente nos anos de 1993 e 2014.

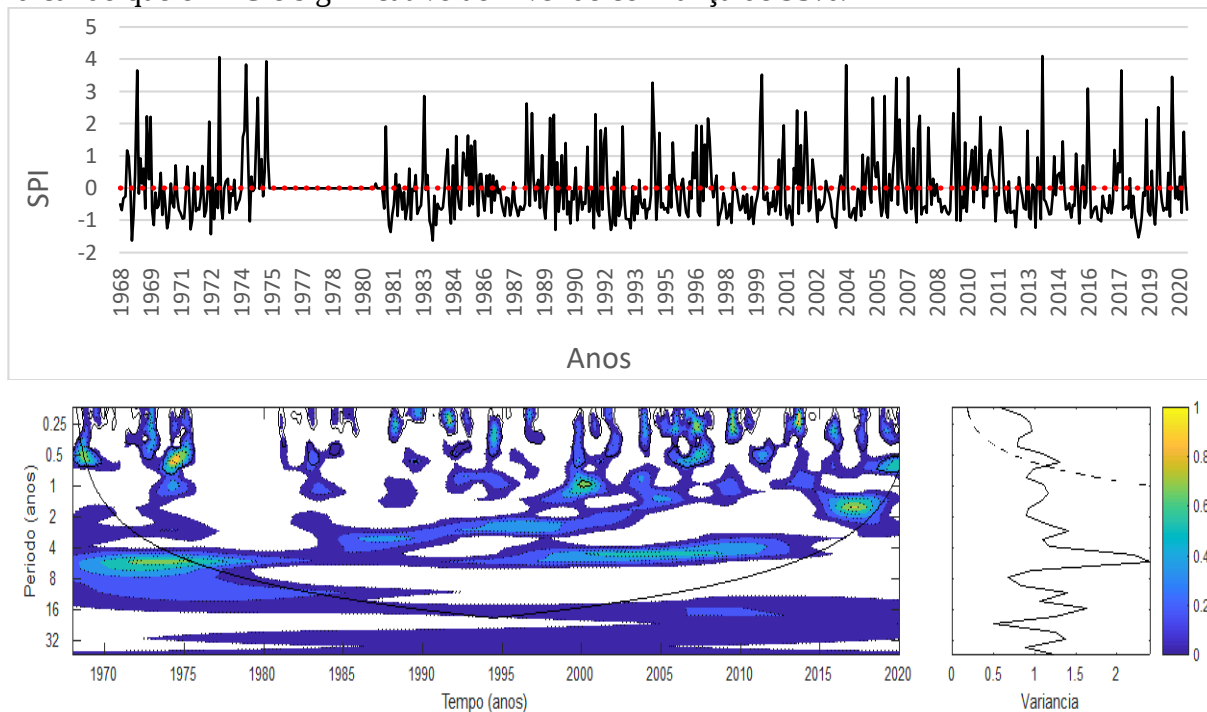
A escala decadal influenciou a série de precipitação e a escala interanual de 1-2 anos foi vista com ênfase. A escala sazonal também apresentou grande significância estatística. Nessa sub-região, a união das escalas temporais com períodos diferentes resultou em altos níveis de precipitação nos anos de 1968, 1976 e 1985 (Figura 24a).

A partir de 1976 a escala de 7 anos ligada ao ENOS e ao Dipolo do Atlântico se pronunciam (Figura 24b), influenciando numa maior variabilidade pluviométrica a partir desse ano para a série.

O BSF não se mostrou tão influenciado pelas escalas decadais, como as demais sub-regiões, que expressaram significância. Observou-se significativa influência da escala sazonal e interanual. Além dessas, a escala de 3 a 7 anos ligada ao ENOS também aparece. A associação de

diferentes escalas temporais, sazonal, interanual, escala de 7 anos ligada ao ENOS e escalas decadais, ocorreu visivelmente nos anos de 1975, 1994, 2000 e 2017 (Figura 25a).

Figura 25: a) Série temporal do SPI para o BSF; b) Espectro de potência de ondaleta (EPO) para SPI do BSF. A curva em forma de U representa o cone de influência, sob a qual o efeito de borda é importante; c) Espectro de potência global (EPG), com o contorno tracejado indicando que o EPG é significativo ao nível de confiança de 95%.



Fonte: Autor (2021).

Além do mais, segundo Clauzet e Wainer (1999), a escala de 7 anos também está associada ao Dipolo do Atlântico e ao sinal persistente do ENOS. A escala sazonal também se mostrou significativa (Figura 25c), sobretudo nos anos de 1968, 1974 e 1976.

Destaca-se a quantidade de registros de seca nessa sub-região, chegando a 37,11% dos eventos, sendo menor apenas que os casos de seca do ASF, no entanto o BSF apresenta tendência de diminuição dos níveis do reservatório e o ASF, de aumento dessa variável, a qual foi mostrada na Tabela 7.

Verifica-se no período entre 1975 a 1980 uma falha em decorrência do preenchimento dos dados de precipitação, já que não havia registro no banco de dados da ANA, por isso não é possível visualizar anomalias para mais ou para menos na série temporal do SPI para o MSF (Figura 23a).

Esses resultados iniciais reforçam a importância do monitoramento hidrometeorológico e a necessidade do uso consciente da água em toda a BHSF, visando um melhor uso e planejamento

do armazenamento hídrico da Região, para que se atinja a segurança hídrica. Segundo Marengo et al (2017), o monitoramento de secas e suas previsões oferecem meios eficientes de avaliar os impactos da variabilidade e das mudanças climáticas, permitindo melhores medidas de adaptação, especialmente no caso das secas.

Além disso, será utilizado o método de Análise de Agrupamentos, a partir do software SPSS, no qual dendrogramas serão gerados, onde unirão os indivíduos mais semelhantes e apontarão os não semelhantes. Essa análise será oportuna para identificar as áreas homogêneas climatologicamente. Identificadas as áreas semelhantes dentro da BHSF, mapas do Software surfer serão gerados, que permitirão uma rápida visualização de áreas climatologicamente semelhantes.

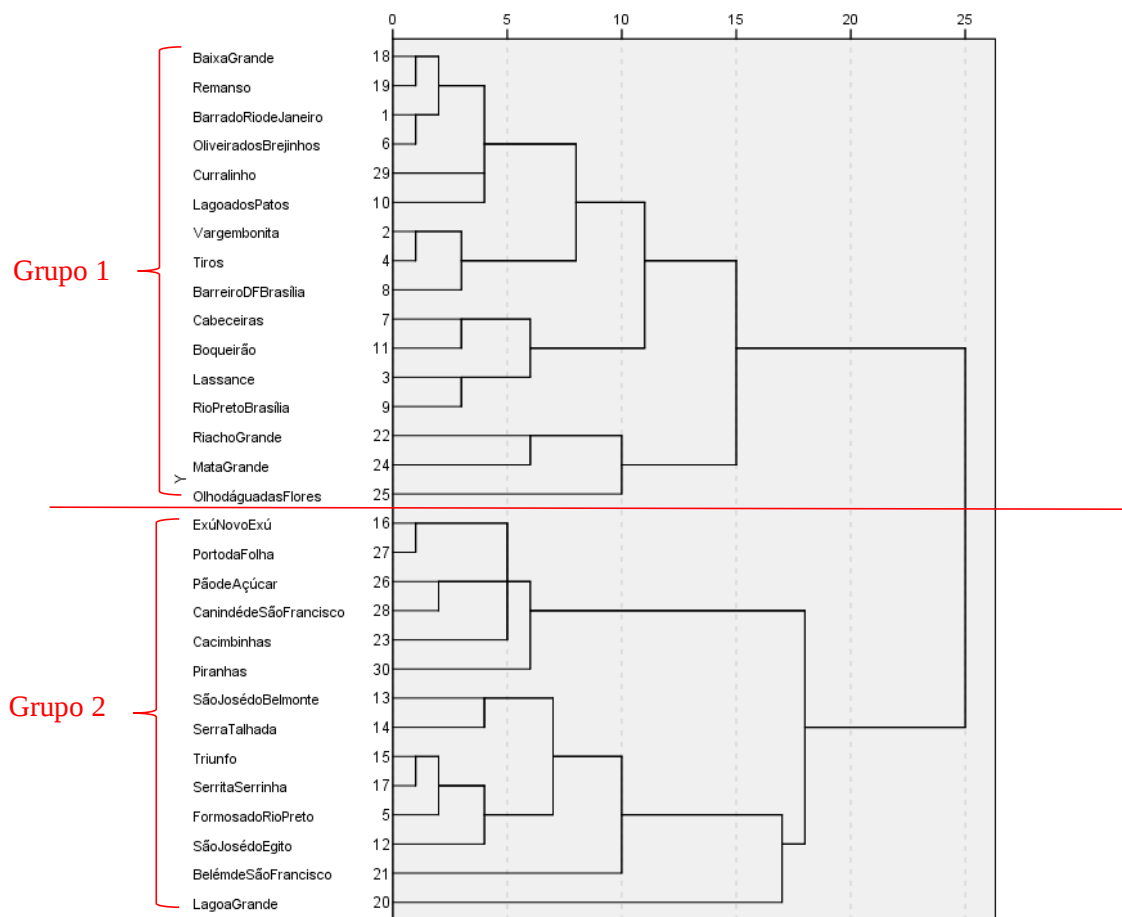
#### 4.6 Análise de Agrupamento

A Análise de Agrupamento foi utilizada para avaliar a semelhança entre as áreas estudadas na BHSF, identificando regiões com comportamento semelhante. À medida que a distância euclidiana aumenta, o nível de semelhança entre séries diminui. Essa análise visa agrupar casos em classes com base em semelhanças dentro de uma classe e dissimilaridades entre diferentes classes (HAIR JUNIOR et al., 2009). Tal análise também foi adotada por diversos autores na identificação de regiões pluviométricas homogêneas (CHIERICE & LANDIM, 2014; GONÇALVES et al., 2016; NEVES et al., 2017; LIRA, 2019).

Para visualizar as diferenças encontradas dentro de uma mesma região, aplicou-se a análise de agrupamento aos valores de SPI de cada uma das sub-regiões, tal qual Neto et al. (2021) identificaram zonas homogêneas sobre o estado da Paraíba em relação ao seu estado, duração e severidade das secas ocorridas nos últimos 20 anos. A apresentação dos resultados na forma de um dendrograma permite representar hierarquicamente os grupos e suas combinações, indicando o nível de similaridade ou dissimilaridade entre eles, assim como Santos et al. (2019) fizeram em seu trabalho.

Com isso, o dendrograma da Figura 26 foi gerado, o qual aponta as estações que formam os grupos de maior semelhança dentro de cada sub-região. As informações contidas nesse gráfico, referem-se às médias anuais das estações. Já os dendrogramas das Figuras 28, 30, 32 e 34, referem-se ao comportamento das estações pluviométricas durante as quatro estações do ano. Para isso, utilizou-se o *software* SPSS® e o método hierárquico. Nesses dendrogramas, o eixo das abcissas indica a distância euclidiana e no eixo das ordenadas estão sinalizadas as estações.

Figura 26: Dendrograma das médias anuais e destaque para os grupos 1 e 2.



Fonte: Autor (2022).

A partir desse dendrograma, é possível identificar as diversas estações pluviométricas que têm semelhança direta entre si, sejam elas dentro da mesma sub-bacia ou até entre sub-bacias distintas, mostrando o grau de semelhança entre elas.

Dentro de uma mesma sub-região, encontrou-se semelhança direta entre as estações 18 (Baixa Grande) e 19 (Remanso), 2 (Vargem Bonita) e 4 (Tiros), 7 (Cabeceiras) e 11 (Boqueirão), 26 (Pão de Açúcar) e 28 (Canindé de São Francisco), 15 (Triunfo) e 17 (Serrita), indicando que os eventos extremos registrados nessas estações são semelhantes em seu comportamento

Já as estações 1 (Barra do Rio de Janeiro) e 6 (Oliveira dos Brejinhos), 29 (Currálinho) e 10 (Lagoa dos Patos), 3 (Lassance) e 9 (Rio Preto), 16 (Exú) e 27 (Porto da Folha), 13 (São José do Belmonte) e 14 (Serra Talhada), apresentaram grandes semelhanças entre si, porém estão localizadas em sub-regiões diferentes. Dessa maneira, os valores de SPI referentes a essas estações indicam que os eventos extremos registrados por elas são semelhantes em seu comportamento e causa.

Nesse conjunto de dados, as estações 18 (Baixa Grande) e 16 (Exú), por exemplo, estão localizadas na mesma sub-região (SMSF), no entanto, a semelhança entre elas é muito pequena, não obstante, estão em grupos completamente diferentes no dendrograma. O mesmo ocorre entre as estações 6 (Oliveira dos Brejinhos) e 5 (Formosa do Rio Preto), ambas localizadas no MSF.

Além disso, a estação 20 (Lagoa Grande) se funde a um dos pontos mais altos do dendrograma, o que pode indicar que essa estação apresenta valores atípicos dentro do conjunto de dados. Desse modo, as estações apresentadas no dendrograma da Figura 21 formam dois grupos climáticos homogêneos e distintos entre eles, semelhante ao que Bonfim et. al (2021) examinaram nas duas Bacias Hidrográficas, de São Paulo, analisadas em seu trabalho.

Observando esse dendrograma, constatou-se que os dois grandes grupos que se assemelham indiretamente, uma vez que apresentaram uma maior distância euclidiana entre eles. O primeiro grupo formado pelas estações 18, 19, 1, 6, 29, 10, 2, 4, 8, 7, 11, 3, 9, 22, 24 e 25, e o segundo, pelas estações 16, 27, 26, 28, 23, 30, 13, 14, 15, 17, 5, 12, 21 e 20. Dessa forma, pode-se constatar que os eventos de seca/chuva que ocorrem nas regiões desses grupos não são tão semelhantes em seu comportamento.

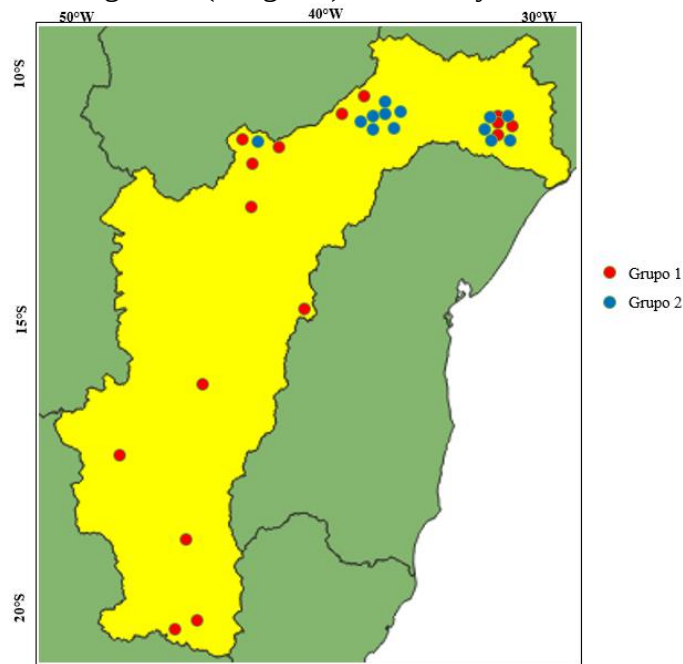
Nenhuma estação apresentou-se de forma isolada em relação as demais, ou seja, não foi formado um grupo unitário, indicando que todas elas possuem algum grau de semelhança entre seus dados.

Para uma melhor visualização dos grupos formados em relação às médias anuais dentro da BHSF, foi gerada a Figura 27.

A partir da imagem da Figura 27 é possível constatar que apenas a sub-região do ASF não apresentou a ocorrência de representantes de suas estações pluviométricas no grupo 2. Nessa sub-região está presente apenas o grupo 1. Nas demais sub-regiões, MSF, SMSF e BSF, vê-se representantes dos dois grupos, mesmo que em pequena quantidade como no MSF no qual houve a ocorrência de apenas um representante do grupo 2.

A sub-região BSF é a que se mostra de forma mais heterogenia em relação aos grupos, tendo quatro representantes no grupo 1 e cinco no grupo 2. Por outro lado, no MSF tem-se apenas uma estação pluviométrica pertencente ao grupo 2, as demais fazem parte do grupo 1.

Figura 27: Mapa de distribuição espacial dos grupos com médias anuais semelhantes. Eixo x são as longitudes (em graus) e no eixo y são as latitudes (em graus).



Fonte: Autor (2022).

Assim como neste estudo, Passos et. al. (2021) empregaram técnicas estatísticas multivariadas em outra importante bacia hidrográfica do Brasil, a bacia do rio Doce, agrupando em seu trabalho, as estações de acordo com a similaridade dos parâmetros selecionados, para as estações seca e chuvosa.

Segundo as concepções de Cabral Júnior e Bezerra (2018), compreender melhor as características espaciais e temporais dos parâmetros meteorológicos, além de ser um importante indicador climático, é também necessário para o aproveitamento eficiente dos recursos hídricos em seus diversos usos, como no abastecimento humano e na produção de energia, por exemplo.

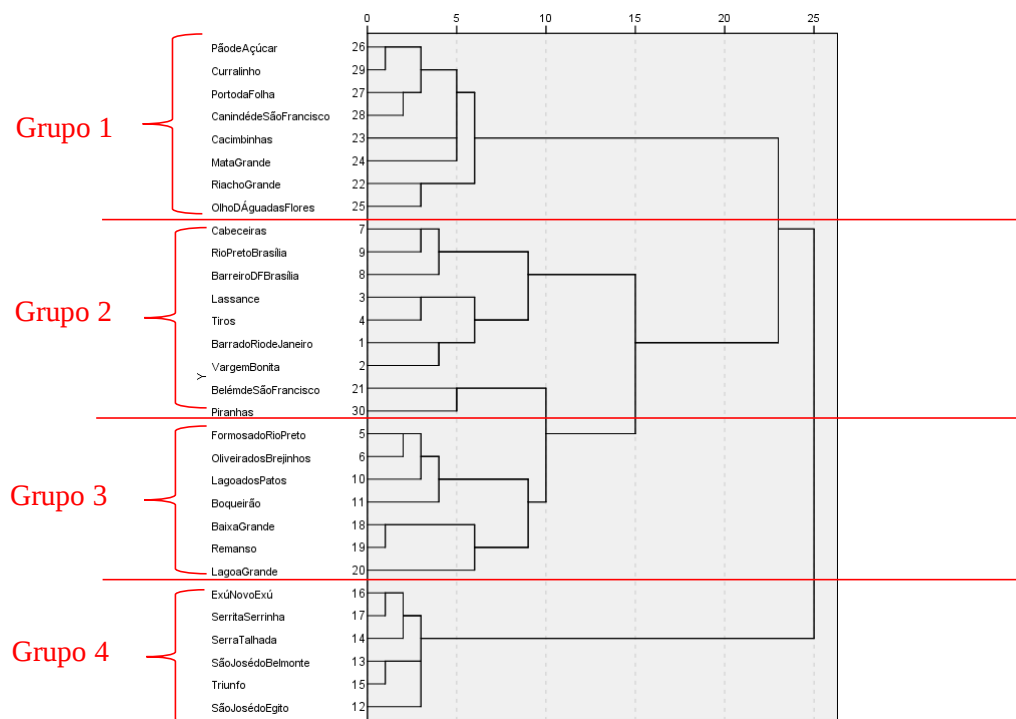
A análise de agrupamento também foi utilizada para avaliar as semelhanças para as estações do ano. As Figuras 28, 30, 32 e 34 mostram os dendrogramas gerados considerando os dados para as quatro estações do ano.

A partir do dendrograma referente ao verão (Figura 28), é possível verificar que as estações pertencentes às seguintes duplas de estações apresentam uma boa semelhança entre si durante essa época do ano: Pão de Açúcar e Curralinho; Baixa Grande e Remanso; Exú e Serrita; e São José do Belmonte e Triunfo, sendo as duas últimas duplas pertencentes ao mesmo grupo.

O dendrograma do verão está notadamente dividido em quatro grupos distintos, compostos pelas seguintes estações. Grupo 1: 26, 29, 27, 28, 23, 24, 22 e 25; grupo 2: 7, 9, 8, 3,

4, 1 e 2; grupo 3: 21, 30, 5, 6, 10, 11, 18, 19 e 20; e o grupo 4: 16, 17, 14, 13, 15 e 12. Dos quatro conjuntos, o grupo 4 apresenta-se de forma pouco semelhante aos demais grupos, sendo o que está mais distante dos outros, dessa forma, é o que se mostra com o menor grau de semelhança entre suas estações e as demais, no verão.

Figura 28: Dendrograma para o verão.



Fonte: Autor (2022).

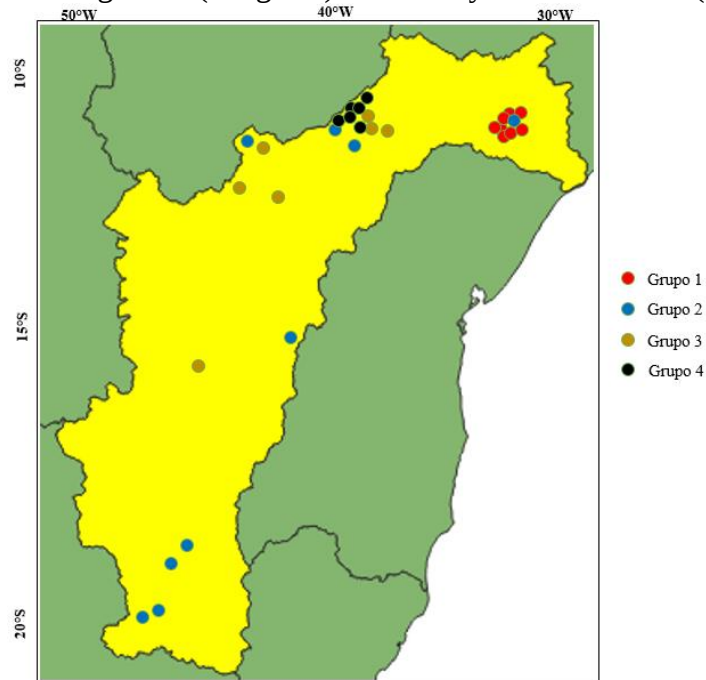
O grupo quatro é composto exclusivamente por estações localizadas no SMSF, região que se distingue das demais nessa estação do ano, sendo o período mais chuvoso (MOURA et. al, 2006). As grandes secas que afetaram o rio São Francisco estiveram historicamente mais concentradas na região do BSF. No entanto, de acordo com a pesquisa de Paredes-Trejo et. al (2021), há sinais de condições crescentes de seca, nas demais áreas da bacia, como é o caso do ASF e MSF.

Os eventos de seca/chuva que ocorrem nessas estações quase que não têm relação. Por outro lado, os grupos 2 e 3, mostram-se mais semelhantes, já que suas distâncias euclidianas são as menores entre todos os outros grupos. De acordo com Portela e Quintela (2006) e Santos (2010), à medida que a precipitação diminui o regime hidrológico torna-se mais irregular e consequentemente mais propenso a secas.

Como o comportamento dos grupos em relação às estações do ano mostrou-se de forma diferente, se comparado aos grupos em relação às médias anuais, as Figuras 29, 31, 33 e 35 foram geradas para uma melhor visualização espacial desses grupos na BHSF.

A Figura 29 traz a distribuição espacial dos grupos por toda a Bacia, durante o verão. A partir dela é possível notar algumas diferenças em relação a Figura 25, começando pelo dobro da quantidade de grupos identificados. A sub-região BSF mostra-se menos heterogênea, sendo a maioria de suas estações pertencentes ao grupo 1, tendo apenas uma representante do grupo 2.

Figura 29: Mapa de distribuição espacial dos grupos semelhantes em relação ao verão. Eixo x são as longitudes (em graus) e no eixo y são as latitudes (em graus).

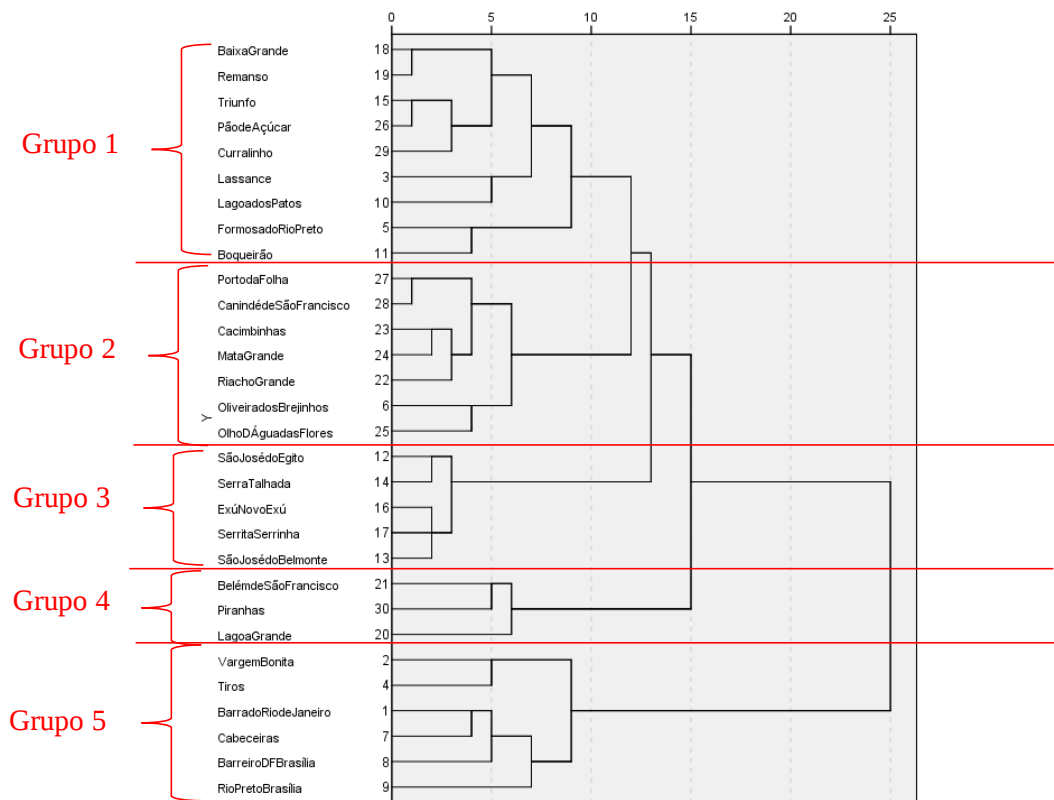


Fonte: Autor (2022).

Por outro lado, percebe-se que todas as estações pluviométricas do ASF pertencem ao mesmo grupo (2), por tanto, as estações pluviométricas dessa sub-região exibem um comportamento semelhante no que diz respeito ao SPI. Já o MSF foi a sub-região que retratou a maior variedade de grupos presentes em seu território, como os grupos 2, 3 e 4, excluindo-se apenas representantes do grupo 1, que ficaram exclusivamente no BSF.

Já a Figura 30 traz o dendrograma referente ao outono. A partir dele é possível verificar a existência de uma maior quantidade de grupos em relação ao dendrograma do verão, neste caso são cinco. Percebe-se, com isso, que durante essa estação do ano, o comportamento nas estações difere de forma visível.

Figura 30: Dendrograma para o outono.



Fonte: Autor (2022).

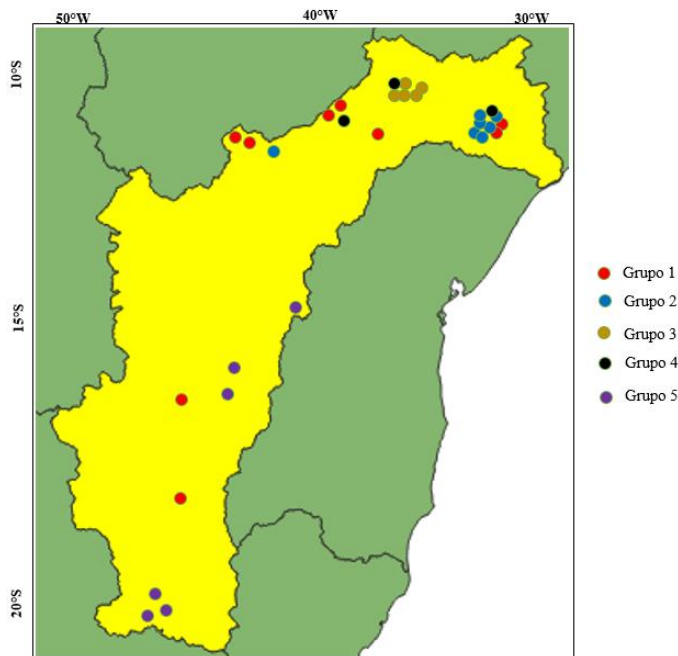
Os grupos 1 e 2 (Figura 30) são os que aparecem como os mais semelhantes, portanto, as características dos eventos de chuva ou seca nessas estações são similares. Por outro lado, o grupo 5 é o que se mostra de forma mais isolada, indicando pouca semelhança entre as estações que o compõe e todas as outras.

As estações que apresentaram as maiores semelhanças foram: Baixa Grande e Remanso, localizadas no SMSF; Triunfo e Pão de Açúcar, a primeira situada no SMSF e a segunda no BSF; Porto da Folha e Canindé de São Francisco, localizadas no BSF. Nota-se que, mesmo situadas em sub-regiões diferentes, as estações Triunfo e Pão de Açúcar apresentaram grandes semelhanças entre si. Dessa maneira, os valores de SPI referentes a essas estações indicam que os eventos extremos registrados por elas são semelhantes em seu comportamento e causa.

Nenhuma estação apresentou-se de forma isolada em relação as demais, ou seja, não foi formado um grupo unitário, indicando que todas elas possuem algum grau de semelhança entre seus dados, mesmo sendo mínimo. Em seu trabalho, os resultados de Oliveira (2017) sugerem que as sub-regiões do NEB são menos influenciadas pelo El Niño e La Niña, e as áreas secas apresentam maior variabilidade, com maior número de eventos intensos.

A Figura 31 foi gerada para exibir a distribuição espacial dos grupos por toda a Bacia, durante a estação do outono. Nela, vê-se que há uma maior aparição de grupos distintos em cada sub-região. No BSF é possível identificar estações pluviométricas pertencentes aos grupos 1, 2 e 4, revelando que durante o outono as estações que representam essa sub-região se comportam de formas distintas no que diz respeito ao SPI.

Figura 31: Mapa de distribuição espacial dos grupos semelhantes em relação ao outono. Eixo x são as longitudes (em graus) e no eixo y são as latitudes (em graus).



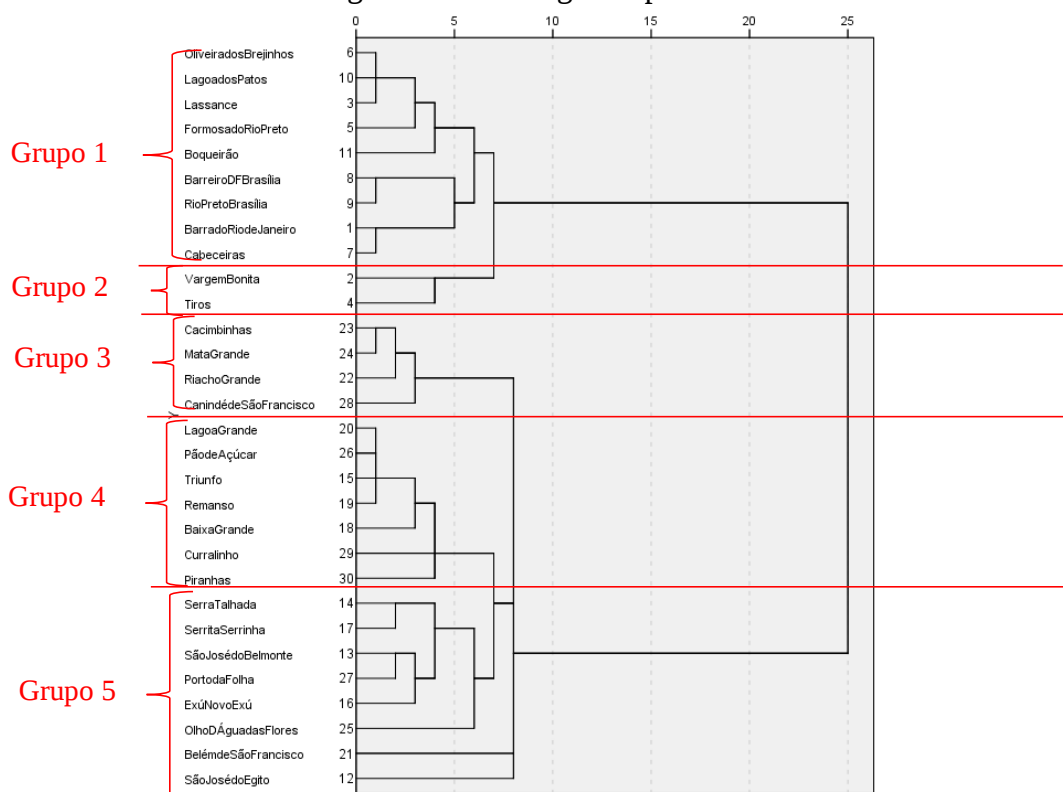
Fonte: Autor (2022).

Percebe-se, também que pela primeira vez, no ASF, constatou-se a presença de mais de um grupo. Dessa for, durante o outono, houve a ocorrência do grupo 1 e do grupo 5. Por tanto, nessa estação do ano, a estação Lassance é a que se comporta de forma menos semelhante em relação as demais estações do ASF, Vargem Bonita, Tiros e Barra do Rio de Janeiro.

O MSF exhibe três grupos distintos em seu território, no entanto a estação Oliveira dos Brejinhos (grupo 2) é a que menos se assemelha às demais estações da sub-região, já que as outras pertencem a outros grupos. Todavia, pode-se constatar que os grupos 1 e 5 apresentam mais estações, indicando a semelhança entre as que fazem parte de um mesmo grupo. No SMSF também é constatada uma boa variedade de grupos, sendo eles os grupos 1, 3 e 4.

O dendrograma da Figura 32 permite observar que na estação do inverno, tem-se uma maior quantidade de estações bastante semelhantes, ou seja, com as menores distâncias euclidianas entre elas.

Figura 32: Dendrograma para o inverno.



Fonte: Autor (2022).

Considerando-se o inverno, a Figura 32 ilustra o comportamento das estações durante essa época do ano. Seu dendrograma mostrou um comportamento particular em relação às demais estações do ano: a considerável distância euclidiana entre os dois primeiros grupos, o primeiro formado pelas estações 6, 10, 3, 5, 11, 8, 9, 1 e 7, e o segundo, bem menor, composto pelas estações 2 e 4. Esses dois primeiros grupos têm um grau de semelhança em relação aos demais grupos, bem pequeno. Ainda assim, os dois apresentam-se bem ligados entre si, indicando comportamentos semelhantes no decorrer do inverno.

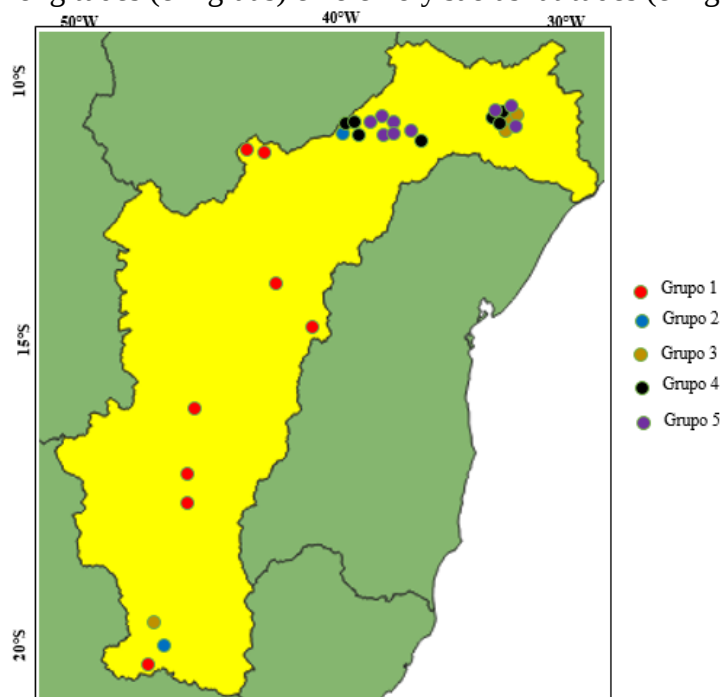
De acordo com a Figura 32, as estações Oliveira dos Brejinhos (6), Lagoa dos Patos (10) e Lassance (3) são similares em seus comportamentos durante o inverno, mesmo a estação 3 estando localizada no ASF, diferentemente das estações 8 e 10 situadas no MSF. De forma parecida, têm-se as estações 8 (Barreiro) e 9 (Rio Preto), 1 (Barra do Rio de Janeiro) e 7 (Cabeceiras), 23 (Cacimbinhas) e 24 (Mata Grande), e o quarteto formado pelas estações 20 (Lagoa Grande), 26 (Pão de Açúcar), 15 (Triunfo) e 19 (Remanso) que ressaltam características análogas entre si.

Além disso, as estações 21 (Belém de São Francisco) e 12 (São José do Egito) se fundem a um dos pontos mais altos dentro do seu grupo, no dendrograma, o que pode indicar que essas

estações apresentam valores atípicos dentro do conjunto de dados, no entanto, continuam semelhantes o suficiente para permanecerem no grupo.

Durante o inverno, assim como no outono, houve a identificação de cinco grupos de estações pluviométricas com algum grau de semelhança. O BSF continua sendo umas das sub-regiões com as maiores variedades de grupos, no entanto, o ASF e o SMSF apresentaram a ocorrência de três grupos distintos, assim como o BSF, como pode ser visto no mapa da distribuição espacial dessa estação (Figura 33).

Figura 33: Mapa de distribuição espacial dos grupos semelhantes em relação ao inverno. Eixo x são as longitudes (em graus) e no eixo y são as latitudes (em graus).



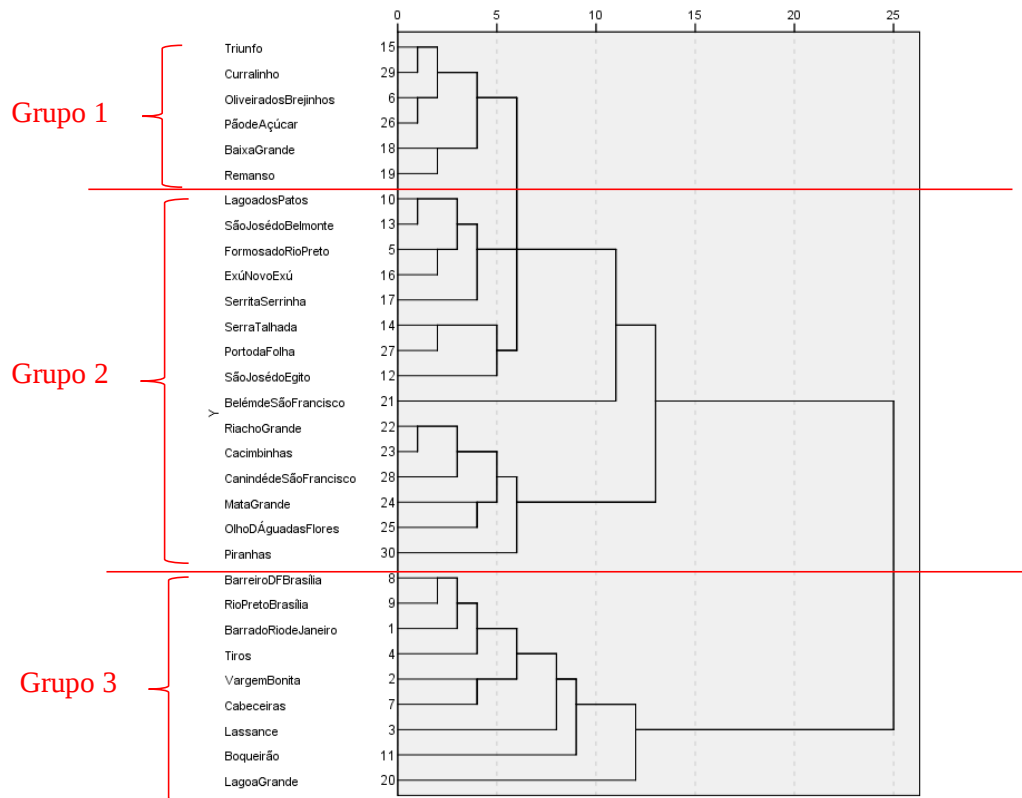
Fonte: Autor (2022).

Apenas o MSF que exibiu um tipo de grupo predominante, ou seja, todas as suas estações mostraram-se semelhantes em seus comportamentos. No entanto, a estação Cabeceiras (grupo 2) é a que menos se assemelha às demais estações da sub-região, estando ela bem próxima a fronteira entre o MSF e o SMSF.

É durante o inverno que o ASF exhibe a maior variedade de grupos. Os grupos 1, 2 e 3 foram identificados nessa sub-região durante a estação. Contudo, as estações Lassance e Barra do Rio de Janeiro pertencem ao mesmo grupo (1), assemelhando-se de forma mais direta, e as estações Vargem Bonita e Tiros, pertencentes a grupos distintos, 2 e 3 respectivamente.

Para a primavera, conforme a Figura 34, percebe-se também a nítida separação de grupos de acordo com as similaridades das estações em relação aos episódios de seca ou chuva durante essa estação do ano.

Figura 34: Dendrograma para a primavera.



Fonte: Autor (2022).

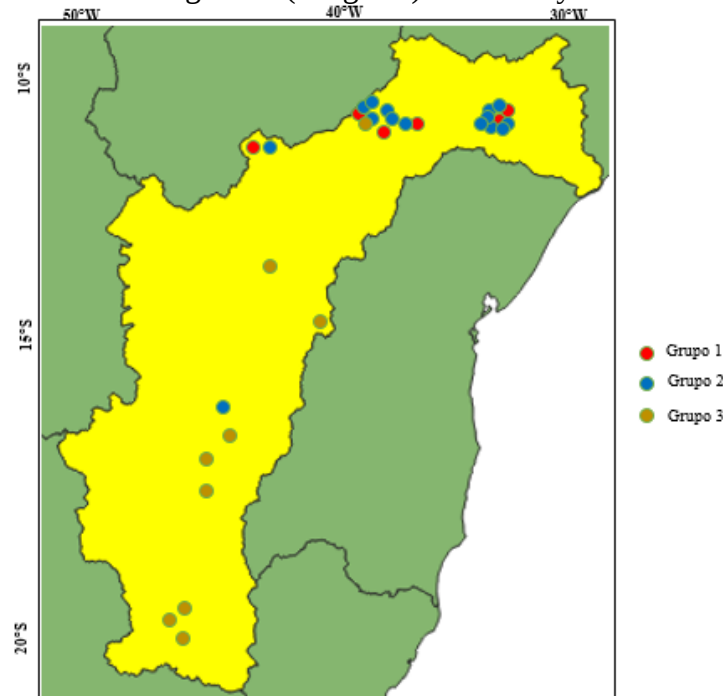
Destacam-se as estações Belém de São Francisco (21) e Lagoa Grande (20) que não têm ligação direta com nenhuma das outras estações, exibindo uma grande distância para as demais. Além dessas, que são as mais proeminentes, tem-se também as estações 30 (Piranhas), 3 (Lassance) e 11 (Boqueirão).

Os grupos 1, 2 e 3 são os que exibem as maiores proximidades, indicando as grandes similaridades no comportamento dos eventos de chuva ou seca dentro da BHSF. No entanto, o último grupo não se apresenta tão ligado aos demais, apontando as diferenças entre os dados pluviométricos de suas regiões e todas as outras.

Para ilustrar a distribuição espacial dos grupos das estações pluviométricas semelhantes durante a primavera, tem-se a Figura 35. Nela, observa-se o menor número de grupos identificados em relação aos demais mapas nas outras estações do ano, sendo apenas três na primavera. Dessa

forma, o SMSF é a sub-região que tem suas estações pluviométricas presentes nos três grupos que foram formados.

Figura 35: Mapa de distribuição espacial dos grupos semelhantes em relação a primavera. Eixo x são as longitudes (em graus) e no eixo y são as latitudes (em graus).



Fonte: Autor (2022).

Mais uma vez, as estações do ASF mostraram-se presentes apenas em um grupo (3), indicando a grande semelhança entre elas durante a primavera. Em contrapartida, no MSF e no SMSF surgiram os três grupos. A estação Belém de São Francisco, pertencente ao grupo 2, é a que não têm ligação direta com nenhuma das outras estações do grupo. Algo semelhante ocorre no grupo 3, no qual a estação Lagoa Grande não exibi ligação direta à outra estação, no entanto, enquadra-se melhor nesse grupo.

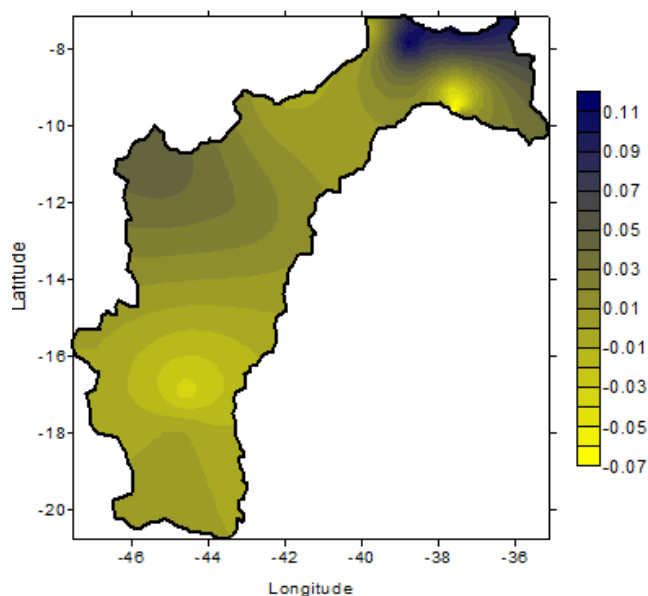
#### 4.7 Distribuição Espacial do Índice de Precipitação Padronizada (SPI)

Buscando visualizar de forma espacial o SPI em toda a BHSF, foram elaborados mapas de distribuição espacial desse índice. Os valores das legendas dos mapas das Figuras 36, 37, 38, 39 e 40 não foram deixados fixos, pois há variação dos valores de SPI, além do mais, alguns valores não ocorrem em todos os mapas. As legendas das figuras destacam o maior e o menor valor de cada análise e onde esses valores ocorrem.

A Figura 36 mostra o comportamento da distribuição espacial do SPI a partir das médias anuais na área da BHSF. A partir dela, é possível notar que, na maior parte da área de estudo, o

SPI médio para o período foi positivo, indicando que os eventos com incidência de chuva considerados quase normais predominaram. Esse tipo de visualização é de grande importância porque espacializa os resultados obtidos.

Figura 36: Distribuição espacial da média anual do SPI na BHSF.



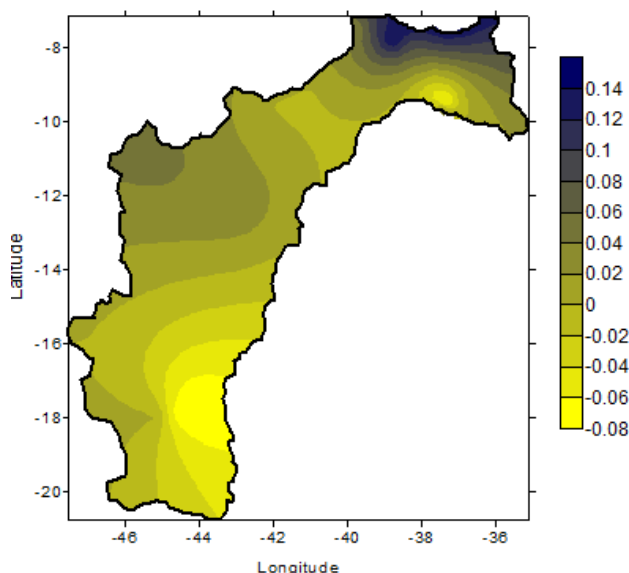
Fonte: Autor (2022).

A região entre o SMSF e o BSF mostrou um comportamento visual diferente das demais regiões, na porção sinalizada pela cor azul mais intensa, com valores de SPI variando entre 0,07 e 0,11, mostrando que esses episódios de SPI normal estão mais localizados nessa pequena porção que abrange parte do estado de Pernambuco. No restante do mapa, pode-se notar a predominância da coloração amarelada, indicando assim, que uma grande parte das localidades no decorrer da Bacia tem um comportamento menos úmido em relação às médias anuais.

Santos et al. (2019) estudaram os episódios de seca no estado da Paraíba entre 1998 e 2015 e também verificaram por meio da espacialização do SPI onde esses eventos se concentram. Notaram que, no período estudado, os eventos quase normais e de seca leve predominaram na região, assim como mostra a Figura 36 para a BHSF, na qual esses episódios estiveram mais presentes no território analisado.

O mapa da Figura 37 ressalta a distribuição espacial do SPI na Bacia durante os meses de verão. Durante essa estação, intensificaram-se os índices negativos de SPI. Embora áreas com valores positivos de SPI sejam observadas em vários pontos da região de estudo, o mapa de distribuição sobre toda a área mostra claramente a predominância de valores negativos em relação aos positivos.

Figura 37: Distribuição espacial do SPI na BHSF no verão.



Fonte: Autor (2022).

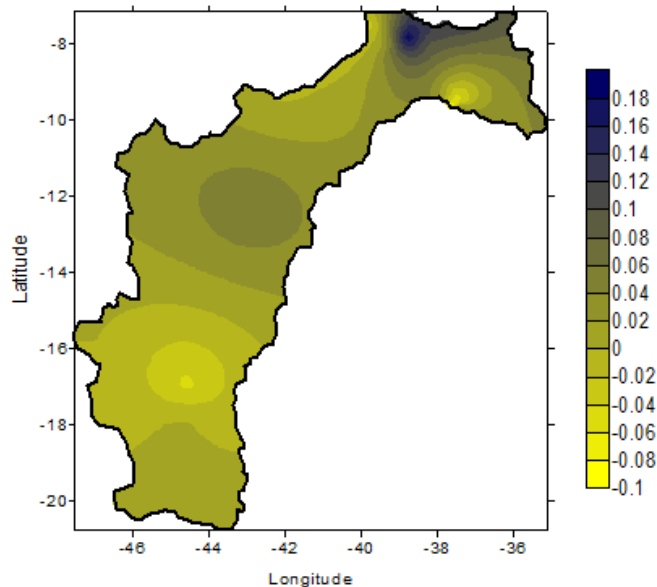
Pode-se notar que durante essa estação, quase todo o ASF e a porção que compreende esse núcleo negativo no BSF se destacam pelos menores valores de SPI da série. Essa constatação aponta que, durante o verão, essas regiões podem apresentar os menores valores de ocorrência de chuvas na Bacia, o que é bastante preocupante já que a nascente do Rio São Francisco está no ASF. Contudo, toda a área está inserida na classificação de quase normal dos eventos de chuva de acordo com o SPI.

É durante o verão que a maior parte região hidrográfica apresenta os menores valores de SPI, por tanto é o período de menor incidência de chuva, no geral. É importante observar que a tendência de degradação da terra na região, combinada com o aumento da frequência de ocorrência de secas, pode ser agravada ainda mais por práticas inadequadas de manejo da terra (como corte e queima) frequentemente utilizadas, assim como Cunha et al. (2018) mostraram em seu trabalho.

Ainda de acordo com Cunha et al. (2018), que fizeram um estudo sobre todo o NEB identificando os eventos extremos de seca na região, a partir do SPI, no período de 1982-2016. Os testes estatísticos ao nível de significância de 5 % para a média da área das séries mensais ajustadas pelo SPI durante indicaram uma tendência de diminuição significativa, o que sugere um aumento na frequência de ocorrência de seca nos últimos anos. Esse estudo ressalta que a maioria das áreas com tendências decrescentes do SPI coincidem com as áreas altamente suscetíveis à desertificação identificadas por Vieira et al. (2015).

Já durante o outono (Figura 38), os valores positivos predominam em quase toda a BHSF, intensificando-se a possibilidade de ocorrência de períodos mais chuvosos. No entanto, têm-se dois núcleos negativos bem latentes, no ASF e no BSF, semelhantes aos mostrados na imagem referente ao verão (Figura 37). Assim como nas duas últimas imagens anteriores (Figuras 36 e 37), o SMSF exibiu os maiores valores da legenda, endossando a tendência dessa porção se mostrar com os valores mais elevados de SPI no intervalo de tempo analisado.

Figura 38: Distribuição espacial do SPI na BHSF no outono.



Fonte: Autor (2022).

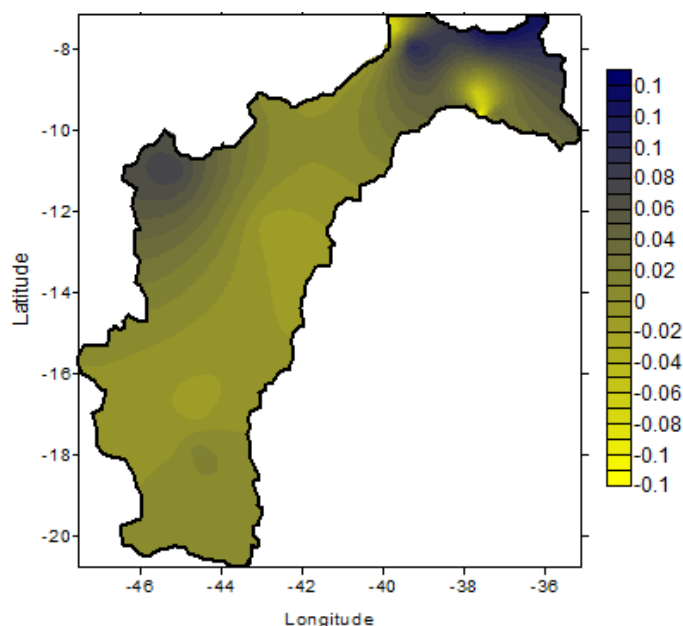
Percebe-se que, ao longo dos meses de outono, a área de estudo foi menos atingida por episódios de escassez de chuva, em comparação com o verão, sobretudo nas sub-regiões do MSF, SMSF e BSF. Não obstante, é durante essa estação do ano que as médias climatológicas do ASF diminuem.

Observa-se também a variabilidade dos valores de SPI entre as diversas regiões da BHSF. Pode-se notar que dentro de uma mesma sub-região, encontram-se valores com uma certa variabilidade, como no BSF, onde é possível encontrar SPI variando entre -0,1 e 0,06, aproximadamente. Costa e Da Silva (2017) fizeram uma análise semelhante para o estado do Ceará, no entanto, utilizando o Índice de Anomalia de Chuvas (IAC), no qual sua distribuição espacial foi realizada com a finalidade de identificar áreas de maior ou menor severidade dos eventos climáticos.

No decorrer da primavera (Figura 39), observa-se que as áreas com valores positivos de SPI aumentaram consideravelmente ao longo da Bacia, quando os máximos ocorreram na porção

oeste do MSF e norte do SMSF e BSF. Já os mínimos foram verificados na porção sul entre o SMSF e o BSF e na parte noroeste do SMSF. Uma sequência de valores negativos do SPI indica uma condição de seca, enquanto os positivos representam um período mais úmido.

Figura 39: Distribuição espacial do SPI na BHSF na primavera.



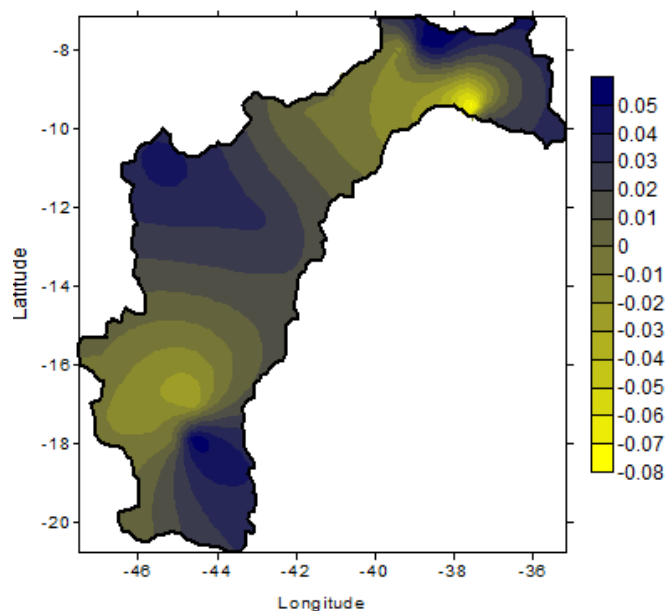
Fonte: Autor (2022).

O SPI também foi explorado no trabalho de Brito et al. (2018). Os autores usaram o SPI de 12 meses para avaliar os eventos de seca ocorridos entre 1981 e 2016, com ênfase na seca que ocorreu entre os anos de 2011 e 2016, na região do semiárido nordestino, afetando os estados do Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Ceará e da Bahia.

Nota-se uma distribuição espacial heterogênea ao longo das estações do ano nos padrões de possibilidade de ocorrência de episódios de escassez e abundância de chuvas, não sendo possível observar um padrão ao longo do ano. Campos e Dos Santos (2017), utilizando diferentes escalas temporais do SPI, trimestral, semestral e anual, constataram que durante o período de 1979-2014, houve uma maior frequência de eventos extremos de seca que de chuva na Amazônia, sendo esse fato averiguado nas quatro estações do ano.

Sob o mesmo ponto de vista, agora considerando o inverno, tem-se Figura 40. A partir dela, pode-se constatar o significativo aumento da frequência de áreas com valores positivos de SPI, indicando uma maior quantidade de localidades com eventos menos secos na Região Hidrográfica.

Figura 40: Distribuição espacial do SPI na BHSF no inverso.



Fonte: Autor (2022).

Destaca-se que, nessa estação, as quatro sub-regiões apresentam valores elevados na escala de SPI, apontando que é durante a estação do inverno que a Bacia pode receber os maiores volumes de água em seu curso.

É notório, observando os mapas de distribuição espacial das quatro estações do ano, que a região entre o SMSF e o BSF persiste em todas elas com os menores valores de SPI da área de estudo, sendo a porção de área que apresenta a maior tendência de ocorrência de episódios de seca na BHSF. Partes do ASF e do MSF também aparecem com valores menores de SPI em relação aos demais pontos.

Brahmananda e Franchito (1992) averiguaram que, de forma geral, a principal estação chuvosa do NEB é de abril a julho, representando cerca de 60% da precipitação anual, e a principal estação seca é de setembro a dezembro. Essas constatações são cruciais para a agricultura e a defesa civil, já que o nordeste do Brasil possui diversas áreas de risco e vulnerabilidade social.

## 5. CONCLUSÕES

Os principais fatores responsáveis pelos maiores desastres naturais estão relacionados aos eventos climáticos extremos, para os quais nenhum país está realmente bem preparado, principalmente países em desenvolvimento ou menos desenvolvidos, como é o caso do Brasil. Nesses países, existem problemas em coletar e armazenar dados meteorológicos de alta qualidade e de longo prazo por causa da infraestrutura pouco desenvolvida e de recursos financeiros limitados, o que se torna ainda mais difícil em regiões áridas e semiáridas, como em uma boa parte da BHSF.

Foi possível analisar o comportamento da precipitação ao longo da BHSF. As sub-bacias ASF, MSF e SBMS se portaram de forma semelhante em relação à época seca, tendo seus períodos mais secos entre os meses de abril a outubro, no geral. Já o BSF, mostrou que seu período seco se estende de agosto a fevereiro, sendo o intervalo menos chuvoso mais longo da Bacia. Em relação ao gráfico de nível de reservatório, o gráfico do ASF é o que apresenta as menores variações ao longo dos anos. Isso acontece porque nessa sub-região existem mais represas e, por isso, o nível de seus reservatórios fica mais controlado. O gráfico de cota média do SMSF também se destacou das demais pelos baixos valores, isso se deu em virtude do processo de evapotranspiração mais intenso que ocorre nessa sub-região.

O SPI é um índice que possibilita quantificar e monitorar o déficit hídrico em escalas temporais de curto, médio e longo prazo e, ainda, em áreas de grande extensão, como é o caso da BHSF. No contexto da gestão do risco de seca, informações como essas são relevantes para subsidiar ações que mitigam os impactos da seca. Os eventos quase normais foram os mais recorrentes, representando 37,42 % dos eventos para o ASF, 58,49 % para o MSF, 57,55 % para o SMSF e 44,18 % para o BSF. Já os eventos de seca extrema não tiveram expressividade no período de tempo estudado, os quais aconteceram apenas no ASF. Em geral, as ocorrências de secas leves e secas moderadas foram maiores que as de chuvas leves e chuvas moderadas, o que pode levar a redução do volume útil dos reservatórios ao longo da Bacia.

As análises de tendências realizadas indicaram que nos 52 anos de dados as sub-regiões MSF, SMSF e BSF apresentaram tendência de diminuição na série de precipitação e de cota, já o ASF apresentou tendência de aumento na série de precipitação e de cota. As maiores tendências de diminuição ocorreram no MSF e no SMSF e as tendências de aumento foram constatadas apenas no ASF, tanto para precipitação como para cota. Essas informações podem ser muito úteis para as

tomadas de decisões em relação aos planos de ação no combate à escassez hídrica em reservatórios, sobretudo aqueles mais importante para as sub-regiões e para a Bacia como um todo.

A associação de diferentes escalas temporais ou ausência de associação, são consideradas as causas para anos de menores índices pluviométricos e consequente redução dos níveis dos reservatórios. A presença das escalas temporais semestral e anual foi observada em todas as sub-regiões, podendo estar associada ao ciclo anual dos sistemas acoplados oceano-atmosfera atuantes na região. Também foram observadas escalas de 7 a 8 anos, relacionadas com eventos ENOS estendido e Dipolo do Atlântico, além da escala de 11 anos, ligada ao ciclo de Manchas solares, mas que também pode estar associado à variabilidade do Dipolo do Atlântico.

Fazendo uso da análise de agrupamento, foram identificadas regiões com comportamento semelhante. Em relação às médias anuais, formaram-se dois grandes grupos climáticos que se assemelham indiretamente entre si. Além das médias anuais, a análise de agrupamento foi utilizada para avaliar as semelhanças para as estações do ano, na qual cada estação apresentou uma organização de grupos distinta. Para o verão, formaram-se quatro grupos, para o outono e o inverno, cinco grupos e para a primavera, surgiram três grupos.

A distribuição espacial dos grupos mostrou que o ASF é a sub-região em que as estações pluviométricas exibem o comportamento mais semelhante entre si, no que diz respeito ao SPI, sobretudo nos meses de verão e inverno. E em relação a distribuição espacial dos valores de SPI, as sub-regiões BSF e ASF, mostraram-se com os menores valores em todas as estações do ano.

O conhecimento dos grupos homogêneos na BHSF pode contribuir de maneira essencial para o gerenciamento dos recursos hídricos, buscando controlar o uso e proteger esses recursos vitais. Os métodos hierárquicos de análise de clusters oferecem um meio de extrair maior compreensão de diferentes séries temporais, sendo um dos instrumentos mais adequados para definir regiões pluviometricamente homogêneas e suas tendências climáticas em escalas regional e global.

A variabilidade da precipitação e a disponibilidade hídrica podem impactar as atividades socioeconômicas, agrícolas e industriais. As regiões hidrográficas que compõem a Bacia possuem características peculiares, justificando a diferença na distribuição espacial da precipitação entre essas regiões. Com as informações da influência dos ciclos temporais sobre a precipitação das sub-regiões da BHSF, é possível visualizar o impacto dos fenômenos climáticos sobre a reserva hídrica da Bacia.

## 5. REFERÊNCIAS

ABREU SÁ, L. D.; SAMBATTI, S. B. M; GALVÃO, G. P. Ondeleta de Morlet aplicada ao estudo da variabilidade do nível do Rio Paraguai em Ladário, MS. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v. 33, p. 1775 - 1785, 1998.

ANA - **Agência Nacional de Águas**; MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: regiões hidrográficas brasileiras**. Brasília. 2015.

ANA - **Agência Nacional de Águas**; MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil**. Brasília. 2019.

ANA - **Agência Nacional de Águas**. São Francisco. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/sala-de-situacao/sao-francisco/saiba-mais>. Acesso em: 20 de agosto de 2020.

AKBAS, A.; FREE, J.; OZDEMIR, H.; BATES, P. D.; TURP, M. T. What about reservoirs? Questioning anthropogenic and climatic interferences on water availability. **Hydrological Processes**, v. 34, n. 26, p. 5441-5455, 2020.

ALCÁNTARA, L. R. P.; BISERRA, J. L. A.; COSTA, L. F.; ALVES, A. T. A.; VILA NOVA, A. A.; SANTOS NETO, S. M.; COUTINHO, A. P.; ANTONINO, A. C. D. Pluviometria espaço-temporal da Bacia hidrográfica do Una. **Geociências**, v. 39, n. 3, p. 803-815, 2020.

ALVALA, R. C.S.; CUNHA, A. P. M. A.; BRITO, S. S. B.; SELUCHI, M. E.; MARENGO, J. A.; MORAES, O. L. L.; CARVALHO, M. A. Drought monitoring in the Brazilian Semiarid region. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 91. 2019.

ALVES, J. M. B. Recentes variações climáticas no Nordeste do Brasil com ênfase a precipitação: relações com o ENOS, dipolo de temperatura da superfície do mar no Atlântico Tropical e a oscilação decadal do Pacífico. **Revista de Geografia**, v. 29, n. 3, 2012.

ALVES, J. M. B.; SILVA, E. M.; SOMBRA, S. S.; BARBOSA, A. C. B.; SANTOS, A. C. S.; LIRA, M. A. T. Eventos extremos diários de chuva no Nordeste do Brasil e características atmosféricas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 32, n. 2, p. 227-233, 2017.

ANDREOLI, R.V.; KAYANO, M.T.; GUEDES, R.L.; OYAMA, M.D.; ALVES, M.A.S. A influência da temperatura da superfície do mar dos Oceanos Pacífico e Atlântico na variabilidade de precipitação em Fortaleza, **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 19, n. 3, p. 337-344, 2004.

ANDREOLI, R. V.; KAYANO, M. T. Enso - related rainfall anomalies in South America and associated circulation features during warm and cold Pacific decadal oscillation regimes, **International Journal of Climatology**, v. 25, n. 15, p. 2017-2030, 2005.

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

ANDRADE, K. M.; CAVALCANTI, I. F. A. Climatologia dos sistemas frontais e padrões de comportamento para o verão na América do Sul. In: **Congresso Brasileiro de Meteorologia**. 2004.

ARAGÃO, J.O.R. **Um estudo da estrutura das perturbações sinóticas do Nordeste do Brasil. 1975. Tese de Doutorado**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais-INPE, São José dos Campos, 1975.

ARAÚJO, L. E.; DA SILVA, D. F. Influência da variabilidade climática sobre a distribuição espaço-temporal da precipitação na região do baixo paraíba (PB). **Caminhos de Geografia**, v. 12, n. 37, 2011.

ASSIS, J. O. **Variabilidade do clima e cenários futuros de mudanças climáticas no trecho submédio da bacia hidrográfica do rio São Francisco**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2005.

ASSIS, J. M. O.; SOUZA, W. M.; KOCH, H., SOBRAL, M. C. M. Influência dos Oceanos Pacífico e Atlântico Tropicais sobre os índices climáticos da precipitação na Bacia do Submédio São Francisco. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 23, 2018.

BRAHMANANDA RAO, V.; DE LIMA, Marley C.; FRANCHITO, S. H. Seasonal and interannual variations of rainfall over eastern northeast Brazil. **Journal of climate**, v. 6, n. 9, p. 1754-1763, 1993.

BERTONI, J. C.; TUCCI, C. E. M. Precipitação. In: TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. Porto Alegre, UFRGS, 177 -214 p., 2007.

BONFIM, O. E. T.; DA SILVA, D. F.; KAYANO, M. T.; ROCHA, L. H. S. Análise dos Eventos Climáticos Extremos e de Suas Causas Climáticas para Redução de Riscos nas Bacias Hidrográficas Aguapeí e Peixe, São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, n. SPE, p. 755-768, 2021.

BRASIL. Disponível em: [https://pt.wikipedia.org/wiki/Brasil#cite\\_note-Encarta\\_8-160](https://pt.wikipedia.org/wiki/Brasil#cite_note-Encarta_8-160). Acesso em: 30 de julho de 2020.

BRAGA, C. C.; AMANAJÁS, J.C.; VITORINO, M. I.; SOUSA, A. J. J.; VENTURA, E. D.; SOUZA, E. P. (2012). Aplicação do Índice de Precipitação Normalizada (SPI) na Determinação de anos secos e chuvosos na região norte do Maranhão. In: XVII Congresso Brasileiro de Meteorologia, Gramado-RS. **Anais...Gramado:SBMet** 2012.

BRITO, S. S. B.; CUNHA, A. P. M. A.; CUNNINGHAM, C. C.; ALVALÁ, R. C.; MARENGO, J. A.; CARVALHO, M. A. (2018). Frequency, duration and severity of drought in the Semiarid Northeast Brazil region. In: Int. **J. Climatol.**, 38, 517-529.

BROCCA, L.; MORAMARCO, T; DORIGO, W; WAGNER, W. Assimilation of satellite soil moisture data into Rainfall-runoff modelling for several catchments worldwide. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). **Anais...** 2013.

CARMO, M. V. N. S.; LIMA, C. H. R. Caracterização Espaço-Temporal das Secas no Nordeste a partir da Análise do índice SPI. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, n. 2, p. 233-242, 2020.

CABRAL JÚNIOR, J., & BEZERRA, B. G. (2018). Análises da evapotranspiração de referência e do índice de aridez para o Nordeste do Brasil. **Revista de Geociências Do Nordeste**, 4, 71–89.

CAMPOS, Thamiris Luisa de Oliveira Brandão; DOS SANTOS, Ana Paula Paes. Frequências dos eventos extremos de seca e chuva na Amazônia utilizando diferentes bancos de dados de precipitação. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 10, n. 2, p. 468-478, 2017.

CARVALHO, M. A. V.; OYAMA, M. D. Variabilidade da largura e intensidade da Zona de Convergência Intertropical Atlântica: Aspectos observacionais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 3, p. 305 - 316, 2013.

CASTRO, C. N.; PEREIRA, C. N. Revitalização da bacia hidrográfica do rio São Francisco: histórico, diagnóstico e desafios. **Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – ipea**. Brasília. 2019.

CAVALCANTI, I. F. A. Episódios El Niño/Oscilação Sul durante a década de 1986 a 1996 e suas influências sobre o Brasil. **Climanálise Especial**, 1996.

CAVALCANTI, I. F. A. **Tempo e clima no Brasil**. Oficina de textos, 2016.

CAVALCANTI, I. F. A; KOUSKY, V. E. **Climatology of South American cold fronts**. In : VII International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography, Wellington, New Zealand, 2003.

CHATTOPADHYAY, S.; EDWARDS, D.R. Long-term trend analysis of precipitation and air temperature for Kentucky, United States. **Climate MDPI**, v. 4, n. 10, p. 1-15, 2016.

CHIERICE, R. A. F., & LANDIM, P. M. B. (2014). Variabilidade espacial e temporal de precipitação pluviométrica na bacia hidrográfica do rio Mogi Guaçu. **Geociências**, 33(1), 157-171.

CPTEC - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. Disponível em: <https://www.cptec.inpe.br/glossario.shtml>. Acesso em: 01 de setembro de 2020.

CHAO, Y.; GHIL, M.; MCWILLIAMS, J. C. Variabilidade interdecadal do Pacífico nas temperaturas da superfície do mar neste século. **Geophysical Research Letters**, v. 27, n. 15, pág. 2261-2264, 2000.

CLAUZET, G.; WAINER, I. Identificação da variabilidade de baixa frequência em algumas regiões da costa sudeste-nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Oceanografia**, v. 47, n. 1, p. 69-78, 1999.

CBHSF - Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. 2016. Disponível em: <https://cbhsaofrancisco.org.br/a-bacia/>. Acesso em: 26 julho de 2020.

Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil: Regiões Hidrográficas Brasileiras. Agência Nacional de Águas (ANA), Ministério do Meio Ambiente, Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos – SPR. 2015. Brasília – DF. Disponível em:

<http://www.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/regioeshidrograficas2014.pdf>. Acesso em: 26 julho de 2020.

COSTA, I. M.; MATEUS, A. E.; DA SILVA, D. F. Escalas temporais e tendências observadas nas temperaturas máximas no Estado do Ceará Timescales and observed trends in the highest temperatures in the state of Ceará. **AMBIÊNCIA**, v. 10, n. 2, p. 465-487, 2014.

COSTA, M. S.; LIMA, K. C.; ANDRADE, M. M.; GONÇALVES, W. A. Tendências observadas em extremos de precipitação sobre a região Semiárida do Nordeste do Brasil. 2015.

COSTA, J. A.; SANTOS, M. A. C. M.; MENDES, K. P. SILVA, G.; MIRANDA, V. G.; MONTEIRO, B. L.; DA SILVA, D. F. Ciclos e períodos de ventos extremos na bacia hidrográfica do rio Jaguaribe (CE). **Revista GeoNordeste**, n. 1, p. 132-148, 2016.

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

CPTEC/INPE. El Niño e La Niña. Disponível em: <http://enos.cptec.inpe.br/>. Acesso em: 26 julho de 2020.

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.; GARCIA, J. V. C.; BROEDEL, E.; ALVALÁ, R.; NETO, G. R. Extreme drought events over Brazil from 2011 to 2019. **Atmosphere**, v. 10, n. 11, p. 642, 2019.

DA SILVA, D. F.; BRITO, J. I. B. Variabilidade do vento na bacia hidrográfica do rio São Francisco durante a ocorrência da ZCAS. **AMBIÊNCIA**, v. 4, n. 2, p. 221-235, 2008.

DA SILVA, D. F. **Variabilidade Espacial e Temporal de componentes dos Balanços de Água e de Energia sobre a Bacia do rio São Francisco com ênfase para a região da ZCAS**. 2005. 132f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2005.

DA SILVA, D. F. **Análise de aspectos climatológicos, ambientais, agroeconômicos e de seus efeitos sobre a Bacia hidrográfica do rio Mundaú (AL e PE)**. 2009. 209 f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2009.

DA SILVA, D.F.; SOUSA, F. A. S.; KAYANO, M. T.; GALVÍNCIO, J. D. Influência da variabilidade climática global e de suas escalas temporais sobre a precipitação no Alto Mundaú (PE). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 2, p. 64-82, 2009.

DA SILVA, D.F.; SOUSA, F. A. S.; KAYANO, M. T. Uso de IAC e ondeletas para análise da influência das multi-escalas temporais na precipitação da bacia do Rio Mundaú. **Revista de Engenharia Ambiental**, v. 6, n. 1, p. 180-195, 2009.

DA SILVA, D. F.; SOUSA, F. A. S.; KAYANO, M. T. Escalas temporais da variabilidade pluviométrica na bacia hidrográfica do rio Mundaú. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 3, p. 324-332, 2010.

DA SILVA, D. F.; GALVÍNCIO, J. D.; NÓBREGA, R. S. Influência da variabilidade climática e da associação de fenômenos climáticos sobre sub-bacias do rio São Francisco. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais** (Online), n. 19, p. 46-56, 2011.

DA SILVA, D. F.; GALVÍNCIO, J. D. Estudo da influência da oscilação decadal do pacífico no nordeste do brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 4, n. 4, p. 665-676, 2011.

DA SILVA, D. F.; GALVÍNCIO, J. D. Estudo da influência da Oscilação Decadal do Pacífico na subbacia do Baixo São Francisco. **Revista Engenharia Ambiental**, v. 10, n. 2, p. 105 - 116, 2013.

DA SILVA, D. F.; COSTA, I. M.; MATEUS, A. E.; SOUSA, A. B. Previsão climática e de ciclos climáticos para o estado do Ceará. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 6, p. 959-977, 2013.

DA SILVA, D. F. Detection of climate trends in macroregions of the Ceará State using FUNCEME data. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 38, n. 1, p. 107-114, 2016.

DA SILVA, D. F. Aplicação de Análises de Ondaletas para Detecção de Ciclos e Extremos Pluviométricos no Leste do Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 2, p. 187-198, 2017.

DA SILVA, D. F.; LIMA, M. J. S.; NETO, P. F. S.; GOMES, H. B.; SILVA, F. D. S.; ALMEIDA, H. R. R. C.; PEREIRA, M. P. S.; COSTA, R. L. Caracterização de eventos extremos e de suas causas climáticas com base no Índice Padronizado de Precipitação Para o Leste do Nordeste. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 02, p. 449-464, 2020.

DA SILVEIRA, L. A. F.; MINE, M. R. M.; NERONE, S. Medidas estruturais de combate aos impactos da seca no Brasil e Estados Unidos. **Anais. XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Associação Brasileira de Recursos Hídricos. 2017.

DE SOUSA, A. B.; DA SILVA, D. F. Causas climáticas da variabilidade pluviométrica e tendências climáticas na bacia hidrográfica do rio Jaguaribe (CE). **Caminhos de geografia**, v. 14, n. 46, 2013.

DELWORTH, T. L.; MANN, M. E. Observed and simulated multidecadal variability in the Northern Hemisphere. **Climate Dynamics**, v. 16, n. 9, p. 661-676, 2000.

DIEDHIOU, A.; MACHADO, L. A. T.; LAURENT, H. Mean Kinematic Characteristics of Synoptic Easterly Disturbances over the Atlantic. **Advances in Atmospheric Sciences**, v. 27, n. 3, p. 483–499, 2010.

EUCLYDES, H. P.; FERREIRA, P. A.; RUBERT, O. A. V.; DOS SANTOS, R. M. Regionalização hidrológica na bacia do alto São Francisco a montante da barragem de Três Marias, Minas Gerais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 6, n. 2, p. 81-105, 2001.

FERREIRA, L. G. C.; KEMENES, A. A influências dos eventos climáticos extremos sobre reservatórios do Nordeste. **Embrapa Meio-Norte-Artigo em periódico indexado (ALICE)**, 2019.

FONSECA, E. R.; MODESTO, F. A.; CARNEIRO, G. C. A.; LIMA, N. F. S.; MONTE-MOR, R. C. A. Conflitos pelo uso da água na Bacia Hidrográfica do rio São Francisco—Estudos de caso

no Estado da Bahia. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 9, p. e823997929-e823997929, 2020.

FREITAS, M. A. S. A Previsão de Secas e a Gestão Hidroenergética: O Caso da Bacia do Rio Parnaíba no Nordeste do Brasil. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL SOBRE REPRESAS Y OPERACIÓN DE EMBALSES, 2004, Puerto Iguazú. **Anais...** Puerto Iguazú: CACIER, 2004, p. 1-1.

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

GALVÍNCIO, J. D; SOUZA, F. A. S. Relação entre o fenômeno El Niño e os totais mensais precipitados na bacia hidrográfica do rio São Francisco. **RBRH-Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 7, n. 4, p. 113-119, 2002.

GOLY, A.; TEEGAVARAPU, R. S. V. Individual and coupled influences of AMO and ENSO on regional precipitation characteristics and extremes. **Water Resources Research**, v. 50, n. 6, p. 4686-4709, 2014.

GONDIM, J.; FIOREZE, A. P.; ALVES, R. F. F., SOUZA, W. G. A seca atual no Semiárido nordestino—Impactos sobre os recursos hídricos. **Parcerias Estratégicas**, v. 22, n. 44, p. 277-300, 2017.

GRIMM, A. M.; ZILLI, M. T. Interannual variability and seasonal evolution of summer monsoon rainfall in South America. **Journal of Climate**, v. 22, n. 9, p. 2257-2275, 2009.

QUADRO, M. F. L.; PEZZI, L. P.; ROSA, E. B. O climanálise e o monitoramento da ZCAS nos últimos 30 anos. Instituto Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brazil , Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, Brazil. 2019.

GUIMARÃES, D. P.; DOS REIS, R. Impactos do fenômeno ENOS sobre a temperatura no Brasil. **Revista Espinhaço| UFVJM**, p. 34-40, 2017.

GUIMARAES, Raphael Mendonca; ASMUS, Carmen Ildes Rodrigues Froes; BURDORF, Alex. Characterization of population exposure to organochlorines: a cluster analysis application. **Revista Brasileira de Epidemiologia**, v. 16, p. 231-239, 2013.

HAIR JUNIOR, J. F., BLACK, W. C., BABIN, B. J., ANDERSON, R. E., & TATHAM, R. L. (2009). *Análise multivariada de dados* (6. ed., 688 p.). Porto Alegre: Bookman.

HAYLOCK, M. R.; PETERSON, T. C.; ALVES, L. M.; AMBRIZZI, T.; ANUNCIAÇÃO, Y. M. T.; BAEZ, J.; BARROS, V. R.; BERLATO, M. A.; BIDEGAIN, M.; CORONEL, G.; CORRADI, V.; GARCIA, V. J.; GRIMM, A. M.; KAROLY, D.; MARENGO, J. A.; MARINO, M. B.; MONCUNILL, D. F.; NECHET, D.; QUINTANA, J.; REBELLO, E.; RUSTICUCCI, M.; SANTOS, J. L.; TREBEJO, I.; VINCENT, L. A. Trends in total and extreme South America rainfall in 1960- 2000 and links with sea-surface temperatures. *Journal of Climate* 19: 1490-1512. 2006.

FEDOROVA, N.; DOS SANTOS, D. M. B.; SEGUNDO, M. M. L.; LEVIT, V. Middle tropospheric cyclonic vortex in Northeastern Brazil and the Tropical Atlantic. **Pure and Applied Geophysics**, v. 174, n. 1, p. 397-411, 2017.

FERREIRA, A. G.; DA SILVA MELLO, N. G. Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a região Nordeste do Brasil e a influência dos oceanos Pacífico e Atlântico no clima da região. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 1, n. 1, 2005.

FILL, H. D. Informações hidrológicas. In: BARTH, F. T. POMPEU, C. T.; TUCCI, C. E. M. KELMAN, J.; BRAGA JÚNIOR, B. P. F. **Modelos para gerenciamento de recursos hídricos**. São Paulo; Nobel – ABRH, p. 95 - 202, 1987.

FREIRE, J. L. M.; LIMA, J. R. A.; CAVALCANTI, E. P. Análise de aspectos meteorológicos sobre o Nordeste do Brasil em anos de El Niño e La Niña. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 3, p. 429-444, 2011.

GONÇALVES, M. F., BLANCO, C. J. C., SANTOS, V. C., OLIVEIRA, L. L. S., & PESSOA, F. C. L. (2016). Identification of Rainfall Homogenous Regions taking into account El Niño and La Niña and Rainfall Decrease in the state of Pará, Brazilian Amazon. *Acta Scientiarum*, 38(2), 209-216. <http://dx.doi.org/10.4025/actascitechnol.v38i2.26534>

GOOSSENS, C.; BERGER, A.. Annual and seasonal climatic variations over the northern hemisphere and Europe during the last century. In: **Annales Geophysicae**. 1986. p. 385.

GUIDO, Z. Natural Variability and Climate Change. University of Arizona. May 16, 2019. Disponível em: <https://climate-woodlands.extension.org>. Acesso em: 23 de julho de 2020.

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

HATHAWAY, D. H. The solar cycle. **Living reviews in solar physics**, v. 12, n. 1, p. 4, 2015.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2010. Disponível em: [https://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/box\\_popclock.php](https://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/box_popclock.php). Acesso em: 30 de julho de 2020.

KAYANO, M. T.; CAPISTRANO, V. B. How the Atlantic multidecadal oscillation (AMO) modifies the ENSO influence on the South American rainfall. **International Journal of Climatology**, v. 34, n. 1, p. 162-178, 2014.

KAYANO, M. T.; KOUSKY, V. E. Tropical circulation variability with emphasis on interannual and intraseasonal time scales. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 11, n. 1 e 2, p. 06 -17. 1996.

KAYANO, M. T.; KOUSKY, V. E. Intraseasonal (30–60 day) variability in the global tropics: principal modes and their evolution. **Tellus A**, v. 51, n. 3, p. 373-386, 1999.

KENDALL, M.G. **Rank Correlation Methods**, 4th ed, Charles Griffin: London, 1975.

KOUSKY, V. E. Frontal influences on Northeast Brazil. **Monthly Weather Review**, v. 107, n. 9, p. 1140-1153, 1979.

KOUSKY, V. E.; GAN, M. A. Upper tropospheric cyclonic vortices in the subtropical South Atlantic. **Tellus** 33:538-551. 1981

KYOUNG, M S.; KIM, S. D.; KIM, B. K.; KIM, H. S. Construção de curvas hidrológicas de severidade-área-duração da seca usando análise de agrupamento. **KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research** , v. 27, n. 3B, pág. 267-276, 2007.

LACERDA, F. F.; LOPES, G. M. B. Extremos de chuva e seca em Pernambuco: uma realidade que veio para ficar. **Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agrônômica**, v. 13, p. 42-46, 2018.

LANNA, A. E. Regularização de vazões em reservatórios. Hidrologia. **Ciência e aplicação**, p. 703-725, 1993.

LOUZADA, F. R. O. **Balanço hídrico climatológico com dados estimados pelo satélite Tropical Rainfall Measuring Mission para a bacia hidrográfica do Rio Doce**. 2016. Tese (Doutorado em produção vegetal) - Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, 2016.

LONDOÑO ARTEAGA, Y. V. **Análise do impacto das mudanças climáticas em índices climáticos associados com a variabilidade dos regimes de chuva e vazão na Bacia do rio São Francisco**. 2019. xviii, 133 f., il. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Universidade de Brasília, Brasília, 2019.

LOPES, J. E. G.; BARROS, M. T. L.; BRANDÃO, J. L. B. Projeto de gerenciamento integrado das atividades desenvolvidas em terra na bacia do São Francisco-subprojeto 4.4: determinação de subsídios para procedimentos operacionais dos principais reservatórios da bacia do São Francisco. Brasília: ANA. GEF/PNUMA/OEA, 2002.

LOPES, Z. F. **Deteção de mudança hidroclimática na Bacia hidrográfica do rio São Francisco. Programa de Pós-Graduação em Geografia**. Tese (Doutorado em geografia) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2014.

LUDWIG, F., KABAT, P., SCHAIK, H.V., VAN DER VALK, M. **Climate change adaptation in the water sector**. Routledge, 2012.

LYRA, M. J. A.; BONFIM, O. E. T.; FEDOROVA, N.; LEVIT, V. Diagnóstico de um Complexo Convectivo de Mesoescala Observado no Semiárido do Nordeste Brasileiro (Mesoscale Convective Complex diagnosis observed in Semi-arid of Northeast Brazil). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 11, n. 6, p. 1998-2009, 2018.

LYRA, M. J. A.; CAVALCANTE, L. C. V.; LEVIT, V.; FEDOROVA, N. Complexos convectivos de mesoescala sobre o Nordeste do Brasil e fenômenos adversos associados. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 9, n. 3, p. 95-103, 2018.

LYRA, M. J. A.; FEDOROVA, N.; LEVIT, V.; DE FREITAS, I. G. F. Características dos Complexos Convectivos de Mesoescala no Nordeste Brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, n. AHEAD, 2020.

MANN, H.B. Non-parametric tests against trend. **Econometrica**, v. 13, p. 245-259, 1945.

MA, H.; YANG, D.; TAN, S. K.; GAO, B. H. Qingfang. Impact of climate variability and human activity on streamflow decrease in the Miyun Reservoir catchment. **Journal of Hydrology**, v. 389, n. 3-4, p. 317-324, 2010.

MANTUA, N. J.; HARE, S. R.; ZHANG, Y.; WALLACE, J. M.; FRANCIS, R. C. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. **Bulletin of the american Meteorological Society**, v. 78, n. 6, p. 1069-1080, 1997.

MANTUA, N. J.; HARE, S. R. The Pacific decadal oscillation. **Journal of oceanography**, v. 58, n. 1, pág. 35-44, 2002.

MARCE, R.; RODRÍQUEZ, M. A.; GARCÍA, J. C.; ARMENGOL, J. El Niño Southern Oscillation and climate trends impact reservoir water quality. **Global Change Biology**, v. 16, n. 10, p. 2857-2865, 2010.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M. Tendências hidrológicas da bacia do rio Paraíba do Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 20, n. 2, p. 215-226, 2005.

MARENGO, J. A. Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade: caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI. **Ministério Do Meio Ambiente Secretaria de Biodiversidade EF**, 2006.

MARENGO, J. A. Mudanças climáticas, condições meteorológicas extremas e eventos climáticos no Brasil. Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável (FBDS). **Mudanças climáticas e eventos extremos no Brasil**. 2009a.

MARENGO, J. A et al. Impactos de extremos relacionados com o tempo e o clima—Impactos sociais e econômicos. **Boletim do Grupo de Pesquisa em Mudanças Climáticas—GPMC, Edição Especial**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - Centro de Ciências do Sistema Terrestre. São Paulo, Brasil. 2009b.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; SOARES, W. R.; RODRIGUEZ, D. A.; CAMARGO, H.; RIVEROS, M. P.; PABLÓ, A. D. Two contrasting severe seasonal extremes in tropical South America in 2012: flood in Amazonia and drought in northeast Brazil. **Journal of climate**, v. 26, n. 22, p. 9137-9154, 2013.

MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A.; SELUCHI, M. E.; CUARTAS, A.; ALVES, L. M.; MENDIONDO, E. M.; OBREGÓN, G.; SAMPAIO, G. A seca e a crise hídrica de 2014-2015 em São Paulo. **Revista USP**, n. 106, p. 31-44, 2015.

MARENGO, J. A.; TORRES, R. R.; ALVES, L. M. Drought in Northeast Brazil—past, present, and future. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 129, n. 3, p. 1189-1200, 2017.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; ALVALA, R. C. S.; CUNHA, A. P.; BRITO, S.; MORAES, O. L. L. Climatic characteristics of the 2010-2016 drought in the semiarid Northeast Brazil region. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 90, n. 2, p. 1973-1985, 2018.

MARENGO, José Antônio. Água e mudanças climáticas. **Estudos avançados**, v. 22, n. 63, p. 83-96, 2008. Acesso em: 25 jul. 2020.

MARTINS, D. M. F.; CHAGAS, R. M.; NETO, J. O. M.; JÚNIOR, A. V. M. Impactos da construção da usina hidrelétrica de Sobradinho no regime de vazões no Baixo São Francisco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 10, p. 1054-1061, 2011.

MCKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. The relationship of drought frequency and duration to times scale. In: CONFERENCE ON APPIED CLIMATOLOGY, Boston. **Anais...** Boston: [s.n.], 1993. p. 179–184. 1993

MEDEIROS, P. R. P.; KNOPPERS, B.; SOUZA, W. F. L.; OLIVEIRA, E. N. Aporte de material em suspensão no baixo rio São Francisco (SE/AL) em diferentes condições hidrológicas. **Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology**, v. 15, n. 1, p. 42-53, 2011.

MELO, D. C. D. **Propagação de secas na bacia do Rio Paraná: do evento climático ao impacto hidrológico**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

MELO, A. B.; DOS SANTOS, L. M. F.; CAMPOS, S. P. Estudo de Caso de um Evento de Distúrbio Ondulatório de Leste. 2019.

MMA – Ministério do Meio Ambiente. Caderno da Região Hidrográfica do São Francisco. 2006.

MOLION, L.C.B.; BERNARDO, S.O. Uma revisão das chuvas no nordeste brasileiro, Revista Brasileira de Meteorologia- SBMET, v. 17, n. 1, p. 1-10, 2002.

MOLION, L. C. B. Aquecimento global, El Niños, manchas solares, vulcões e Oscilação Decadal do Pacífico. **Climanalise, CPTEC/INPE**, 2005.

MORAES, B. C.; ABREU SÁ, L. D. Análise de Wavelet na série de precipitação da floresta nacional de Caxiuanã - PA. Congresso Brasileiro Meteorologia, 14, 2006. **Anais...** Florianópolis, RS, CBMET, 2006.

MORAES, F. D. S. Ambiente atmosférico favorável ao desenvolvimento de Complexos Convectivos de Mesoescala no Sul do Brasil. 2016.

MOURA, A. D.; SHUKLA, J. On the dynamics of droughts in northeast Brazil: Observations, theory and numerical experiments with a general circulation model. **Journal of the atmospheric sciences**, v. 38, n. 12, p. 2653-2675, 1981.

MOURA, M. S. B.; SÁ, I. I. S.; DA SILVA, T. G. F.; GALVINCIO, J. D.; RIBEIRO, J. G. Variação espacial da precipitação e temperatura do ar no Submédio São Francisco. In: **Embrapa Semiárido-Artigo em anais de congresso (ALICE)**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 14., 2006, Florianópolis. Anais... Florianópolis: SBMET, 2006., 2006.

MOURA, M. N.; VITORINO, M. I. Variabilidade da precipitação em tempo e espaço associada à zona de convergência intertropical. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 27, n. 4, p. 475 - 483, 2012.

- NASCIMENTO, F. C. A.; Braga, C. C.; Araújo, F. R. C. D. Análise Estatística dos Eventos Secos e Chuvosos de Precipitação do Estado do Maranhão. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 32, 375-386, 2017.
- NETO, R. M. B.; SANTOS, C. A. G.; DA SILVA, R. M.; DOS SANTOS, C. A. C.; LIU, Z.; QUINN, N. W. Geospatial cluster analysis of the state, duration and severity of drought over Paraíba State, northeastern Brazil. *Science of the Total Environment*, v. 799, p. 149492, 2021.
- NEVES, D. J. D.; ALCÂNTARA, C. R.; SOUZA, E. P. Case Study of an Easterly Wave Disturbance Over Rio Grande do Norte State-Brazil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 31, n. 4, p. 490-505, 2016.
- NEVES, R. R., GONÇALVES, E. D., PESSOA, F. C. L., FERNANDES, L. L., GÓMEZ, Y. D., & SANTOS, J. I. N. (2017). Identificação de regiões pluviometricamente homogêneas na sub bacia Trombetas. *Revista AIDIS*, 10(2), 125-135.
- NEWMAN, Matthew *et al.* A oscilação decadal do Pacífico, revisitada. *Journal of Climate*, v. 29, n. 12, pág. 4399-4427, 2016.
- NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration. Disponível em: <https://www.weather.gov/news/201509-solar-cycle>. Acesso em 24 de outubro de 2020.
- NOU, E. A. V. Diagnóstico da qualidade ambiental da bacia do rio São Francisco: sub-bacias do oeste baiano e Sobradinho. Secretaria de Planejamento, Orçamento e Coordenação, Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Diretoria de Geociências, Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, Primeira Divisão de Geociências do Nordeste, 1994.
- OLIVEIRA, L. F. C.; FIOREZE, A. P.; MEDEIROS, A. M. M.; SILVA, M. A. S. Comparação de falhas de séries históricas de precipitação pluvial anual. *Revista brasileira de Engenharia agrícola e Ambiental*, v. 14, n. 11, p. 1186 - 1192, Campina Grande, PB, 2010.
- OLIVEIRA SERRÃO, E. A.; DOS SANTOS, C. A.; WANZELER, R. T. S.; DE LIMA, A. M. M. Avaliação da seca de 2005 e 2010 na Amazônia: análise da bacia hidrográfica do rio Solimões. *Revista Geográfica Acadêmica*, v. 9, n. 2, p. 5-20, 2015.
- OLIVEIRA, D. M.; SILVEIRA, M. V. D. Clima espacial e choques interplanetários. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 38, n. 1, 2016.
- OLIVEIRA, P. T.; SILVA, S.; LIMA, K. C. Climatologia e análise de tendências de precipitação extrema em sub-regiões do Nordeste do Brasil. *Climatologia Teórica e Aplicada*, v. 130, n. 1, pág. 77-90, 2017.
- PAREDES-TREJO, F.; BARBOSA, H. A.; GIOVANNETTONE, J.; KUMAR, T. V. L.; THAKUR, M. K.; BURITI, C. O.; UZCÁTEGUI-BRICEÑO, C. Drought Assessment in the São Francisco River Basin Using Satellite-Based and Ground-Based Indices. *Remote Sensing*, v. 13, n. 19, p. 3921, 2021.
- PASSOS, J. B. M. C.; TEIXEIRA, D. B. S.; CAMPOS, J. A.; LIMA, R. P. C.; FILHO, E. I. F.; DA SILVA, D. D. Multivariate statistics for spatial and seasonal quality assessment of water in

the Doce River basin, Southeastern Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 193, n. 3, p. 1-16, 2021.

PEZZI, L. P.; CAVALCANTI, I. F. A. A importância relativa de ENOS e anomalias da temperatura da superfície do oceano Atlântico tropical para a precipitação sazonal na América do Sul: um estudo numérico. **Climate Dynamics**, v. 17, n. 2-3, pág. 205-212, 2001.

QUADRO, M. F. L.; ABREU, M. L. Estudos de episódios de Zonas de Convergência do Atlântico Sul sobre a América do Sul. In: **Congresso Brasileiro de Meteorologia**. 1994. p. 620-623.

RAJSEKHAR, D.; SINGH, V. P.; MISHRA, A. K. Multivariate drought index: An information theory based approach for integrated drought assessment. **Journal of Hydrology**, v. 526, p. 164-182, 2015.

RAMÍREZ, M. C. V; KAYANO, M. T.; FERREIRA, N. J. Statistical analysis of upper tropospheric vortices in the vicinity of northeast Brazil during the 1980-1989 period. **Atmósfera**, v. 12, n. 2, p. 75-88, 1999.

RIGOZO, N. R.; NORDEMANN, D. J. R. Registros da atividade solar nos anéis de crescimento de árvores em São Francisco de Paula-RS (Brasil). **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 18, n. 1, p. 91-97, 2000.

RUSTICUCCI, M., PENALBA, O. Interdecadal changes in the precipitation seasonal cycle over Southern South America and their relationship with surface temperature. *Climate Research*, 16, 1-15, 2000.

ROSENZWEIG, C.; IGLESIUS, A.; YANG, X B.; EPSTEIN, P. R.; CHIVIAN, E. Climate change and extreme weather events-Implications for food production, plant diseases, and pests. 2001.

ROSSO, F. V.; BOIASKI, N. T.; FERRAZ, S. E. T.; ROBLES, T. C. Influence of the Antarctic Oscillation on the South Atlantic Convergence Zone. **Atmosphere**, v. 9, n. 11, p. 431, 2018.

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

RUSSELL, C. T.; LUHMANN, J. G.; STRANGEWAY, R. J. **Space physics: An introduction**. Cambridge University Press, 2016.

SÁNCHEZ-VELASCO, L.; BEIER, E.; GODINEZ, V. M.; BARTON, E. D.; SANTAMARIA-DEL-ANGEL, E.; JIMÉNEZ-ROSEMBERG, S. P. A.; MARINONE, S. G. Hydrographic and fish larvae distribution during the “Godzilla El Niño 2015–2016” in the northern end of the shallow oxygen minimum zone of the Eastern Tropical Pacific Ocean. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 122, n. 3, p. 2156-2170, 2017.

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

SANTOS, C. A. G.; MORAIS, B. S.; SILVA, G. B. L. Drought forecast using an artificial neural network for three hydrological zones in San Francisco River basin, Brazil. **IAHS publication**, v. 333, p. 302, 2009.

SANTOS, C. A. G.; NETO, R. M. B; DA SILVA, R. M.; COSTA, S. G. F. Cluster analysis applied to spatiotemporal variability of monthly precipitation over Paraíba state using tropical rainfall measuring mission (TRMM) data. **Remote Sensing**, v. 11, n. 6, p. 637, 2019.

SANTOS, C. A. G.; MORAIS, B. S.; SILVA, G. B. L. Drought forecast using an artificial neural network for three hydrological zones in San Francisco River basin, Brazil. **IAHS publication**, v. 333, p. 302, 2009

SANTOS, E. P.; CORREIA, M. F.; ARAGÃO, M. R. S.; SILVA, F. D. S. Eventos extremos de chuva e alterações no regime hidrológico da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco: Uma aplicação do índice RAI (Rainfall Anomaly Index). 2011.

SANTOS, E. P.; CORREIA, M. F., ARAGÃO, M. R. S.; DE ARAÚJO, L. E.; SILVA, F. D. S. Padrão Mensal de Anomalias de Precipitação: Uma Análise Estatística de Eventos Hidrológicos Extremos nas Sub-Bacias do Rio São Francisco. **Rev. Bras. Geogr. Fís**, v. 6, n. 5, p. 1193-1207, 2013.

SANTOS, J. F.; PULIDO-CALVO, I.; PORTELA, M. M. Spatial and temporal variability of droughts in Portugal. **Water Resources Research**, v. 46, n. 3, 2010.

SANTOS, M. S. **Caracterização espaço-temporal de secas utilizando ondaletas e o Standardized Precipitation Index: uma aplicação para a parcela mineira da bacia Rio São Francisco**. 2011. 163p. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

SANTOS, M. D. **Comunidades parasitárias de três espécies de peixes carnívoros do Reservatório de Três Marias, Alto Rio São Francisco, Minas Gerais, Brasil**. 2008. 186p. Tese de Doutorado - Instituto de Veterinária, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica.

SANTOS, S. R. Q.; BRAGA, C. C.; VENTURA, E. D.; CAMPOS, T. B.; SANTOS, A. P. P. (2012). Aplicação do Índice de Precipitação Normalizada (SPI) para cidade de Belém. In: XVII Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2012, Gramado - RS. In: XVII Congresso Brasileiro de Meteorologia, Gramado-RS. **Anais...Gramado:SBMet** 2012.

SANTOS, Celso Augusto Guimarães et al. Innovative approach for geospatial drought severity classification: a case study of Paraíba state, Brazil. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 33, n. 2, p. 545-562, 2019.

SCHIERMEIER, Q. Caçando o Godzilla El Niño. **Nature** , v. 526, n. 7574, pág. 490, 2015.

SERVAIN, J. Simple climatic indices for the tropical Atlantic Ocean and some applications. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 96, n. C8, p. 15137-15146, 1991.

SERVAIN, Jacques *et al.* Uma pesquisa piloto ancorada no Atlântico tropical (PIRATA). **Boletim da Sociedade Meteorológica Americana** , v. 79, n. 10, pág. 2019-2032, 1998.

SILVA, B. C.; T CLARKE, R. Análise estatística de chuvas intensas na Bacia do Rio São Francisco. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 19, n. 3, p. 265-272, 2004.

SILVA, A. P. L. M. **Avaliação hidrológica e meteorológica para a transposição de águas da bacia do rio São Francisco**. 2004. Tese de D. Sc. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

SILVA DIAS, M. A. F. Eventos climáticos extremos. **Revista USP**, n. 103, p. 33-40, 2014.

SILVA, R. A.; DA SILVA, V. P. R; CAVALCANTI, E. P.; DOS SANTOS, D. N. Estudo da variabilidade da radiação solar no Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 5, p. 501-509, 2010.

SILVA, M. C; FEDOROVA, N. Processo de Formação do Vórtice Ciclônico de Médios Níveis na Região Continental e Fenômenos Associados (Process of formation of the cyclonic vortex of middle levels in the continental region and associated phenomena). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 12, n. 2, p. 365-379, 2019.

SILVA, V. O. **Eventos de seca na região sudeste do Brasil: ocorrências temporais e comportamento futuro**. 2018. 148f. 2018. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos de Sistemas Agrícolas, Universidade Federal de Lavras, Lavras.

SILVA, T. L. V. Ocean-atmosphere processes and easterly waves in the generation and development of extreme events in the Eastern Northeast of Brazil. 2018.

SMITHERS, J.; SMIT, B. Human adaptation to climatic variability and change. **Global environmental change**, v. 7, n. 2, p. 129-146, 1997.

SOARES, E. Seca no Nordeste e a transposição do rio São Francisco. **Revista Geografias**, p. 75-86, 2013.

SOUNDHARAJAN, B. S.; ADELOYE, A. J.; REMESAN, R. Evaluating the variability in surface water reservoir planning characteristics during climate change impacts assessment. **Journal of Hydrology**, v. 538, p. 625-639, 2016.

SOUSA GURJÃO, C. D.; CORREIA, M. F.; FILHO, J. B. C.; ARAGÃO, M. R. S. Influência do Enos (El Niño-Oscilação Sul) no Regime Hidrológico do Rio São Francisco: uma Análise em Regiões com Fortes Pressões Antrópicas. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 5, n. 4, p. 774-790, 2012.

SOUZA, L. R. **Simulação hidrológica e aplicação de uma análise multivariada no estudo de chuva-vazão na bacia hidrográfica do Rio São Francisco**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais. 2012.

STRECK, N. A.; BURIOL, G. A.; HELDWEIN, A. B.; GABRIEL, L. F.; PAULA, G. M. Associação da variabilidade da precipitação pluvial em Santa Maria com a Oscilação Decadal do Pacífico. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, n. 12, p.1553 - 1561, 2009.

STUDART, T.M.C., CAMPOS, J.N.B. e SOUSA, F.M. "Impactos das Mudanças Climáticas nas Disponibilidades Hídricas de Reservatórios: Um Estudo de Caso". **Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, promovido pela Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Aracaju, Sergipe, 2001.

SUN, T.; FERREIRA, V. G.; HE, X.; ANDAM-AKORFUL, S. A. Water availability of São Francisco river basin based on a space-borne geodetic sensor. **Water**, v. 8, n. 5, p. 213, 2016.

TORRENCE, Christopher; WEBSTER, Peter J. Interdecadal changes in the ENSO–monsoon system. **Journal of climate**, v. 12, n. 8, p. 2679-2690, 1999.

TUCCI, C. E. M. Impactos da variabilidade climática e uso do solo sobre os recursos hídricos. Fórum Brasileiro de Mudanças Climáticas–Câmara Temática de Recursos Hídricos, Brasília, 2002.

TUCCI, C. E. M et al. Hidrologia: Ciência e Aplicação, 3ª edição. **Porto Alegre, Editora da UFRGS/ABRH**, 2004.

TØTTRUP, A. P.; KLAASSEN, R. H. C.; KRISTENSEN, M. W.; VARDANIS, Y.; LINDSTRONM, A.; RAHBK, C.; ALERSTAM, T.; THORUP, K. Drought in Africa caused delayed arrival of European songbirds. **Science**, v. 338, n. 6112, p. 1307-1307, 2012.

VALVERDE RAMÍREZ, M. C. Padrões climáticos dos vórtices ciclônicos em altos níveis no Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 17, n. 1, p. 92-93, 1999.

VIEIRA, R. M. S. P.; TOMASELLA, J.; ALVALÁ, R. C. S.; SESTINI, M. F.; AFFONSO, A. G.; RODRIGUEZ, D. A.; BARBOSA, A. A.; CUNHA, A. P. M. A.; VALLES, G. F.; CREPANI, E.; OLIVEIRA, S. B. P.; SOUZA, M. S. B.; CALIL, P. M.; CARVALHO, M. A.; VALERIANO, D. M.; CAMPELLO, F. C. B.; SANTANA, M. O. (2015) Identificando áreas suscetíveis à desertificação no nordeste brasileiro. **Terra Sólida** , 6 , 347 – 360 .

YANG, S.; LI, Z.; YU, J. Y.; HU, X.; DONG, W.; HE, S. El Niño–Southern Oscillation and its impact in the changing climate. **National Science Review**, v. 5, n. 6, p. 840-857, 2018.

YUE, S; PILON, P; CAVADIAS, G. Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. **Journal of Hydrology** 259:254-271. 2002.

WANG, Y.-M.; SHEELEY JR, N. R. The solar wind and interplanetary field during very low amplitude sunspot cycles. **The Astrophysical Journal**, v. 764, n. 1, p. 90, 2013.

ZHANG, C. Madden-Julian oscillation. **Reviews of Geophysics**, v. 43, n. 2, 2005.

