

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
INSTITUTO DE GEOGRAFIA, DESENVOLVIMENTO E MEIO AMBIENTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA**

GEORGE ANTONIO JANGARELLI

**VARIABILIDADES PLUVIAL E FLUVIAL NA REGIÃO FISIAGRÁFICA DO BAIXO
SÃO FRANCISCO**

Orientador: Prof. Dr. Melchior Carlos do Nascimento
Coorientador: Prof. Dr. Jório Bezerra Cabral Júnior

Maceió – AL
2023

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
INSTITUTO DE GEOGRAFIA, DESENVOLVIMENTO E MEIO AMBIENTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA**

GEORGE ANTONIO JANGARELLI

**VARIABILIDADES PLUVIAL E FLUVIAL NA REGIÃO FISIOGRAFICA
DO BAIXO SÃO FRANCISCO**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Geografia, do Instituto de Geografia, Desenvolvimento e Meio Ambiente, da Universidade Federal de Alagoas, como parte das exigências para obtenção do grau de Mestre em Geografia: Dinâmica Socioambiental e Geoprocessamento.

Orientador: Prof. Dr. Melchior Carlos do Nascimento
Coorientador: Prof. Dr. Jório Bezerra Cabral Júnior

Maceió – AL
2023

Catálogo na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecário: Marcelino de Carvalho Freitas Neto – CRB-4 – 1767

J33v Jangarelli, George Antonio.
Variabilidades pluvial e fluvial na região fisiográfica do Baixo São Francisco / George Antonio Jangarelli. – 2023.
82 f. : il. color.

Orientador: Melchior Carlos do Nascimento.
Co-orientador: Jório Bezerra Cabral Júnior.
Dissertação (mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Alagoas. Instituto de Geografia, Desenvolvimento e Meio Ambiente. Maceió, 2023.

Bibliografia: f. 74-82.

1. Chuvas. 2. Vazão hídrica. 3. Bacias hidrográficas. 4. Semiárido. I. Título.

CDU: 911.2:556.51

Folha de Aprovação

GEORGE ANTONIO JANGARELLI

Variabilidades pluvial e fluvial na Região Fisiografica do Baixo São Francisco

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Geografia, do Instituto de Geografia, Desenvolvimento e Meio Ambiente, da Universidade Federal de Alagoas, como parte das exigências para obtenção do grau de Mestre em Geografia: Dinâmica Socioambiental e Geoprocessamento.

Orientador: Prof. Dr. Melchior Carlos do Nascimento
Universidade Federal de Alagoas – UFAL

Coorientador: Prof. Dr. Jório Bezerra Cabral Júnior
Universidade Federal de Alagoas – UFAL

Banca examinadora:

1º Examinador (Interno): Prof. Dr. Kleython de Araújo Monteiro
Universidade Federal de Alagoas – UFAL

2º Examinador (Externo): Profa. Dra. Rebecca Luna Lucena
Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN

A quem os resultados aqui produzidos puderem ajudar de alguma forma, dedico esta dissertação.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a minha família, que tem me apoiado incondicionalmente nos meus estudos. São os principais responsáveis pela conclusão de mais essa etapa.

Aos professores do programa de mestrado do IGdema, por todos os ensinamentos que me proporcionaram ao longo da minha passagem pela pós-graduação.

Ao meu orientador, professor doutor Melchior Carlos do Nascimento, pelos ensinamentos, e pela atenção com as demandas que tive durante a minha estadia na cidade de Maceió.

Ao meu coorientador, professor doutor Jório Bezerra Cabral Junior, pelo auxílio nas diferentes etapas deste trabalho de pesquisa.

Também agradeço e declaro meu profundo respeito a todos os professores e demais agentes sociais, que através da sua luta, garantem a existência das instituições públicas de ensino superior no Brasil.

*“Senhor, eu pedi para o sol se esconder um tiquinho
Pedi pra chover, mas chover de mansinho
Pra ver se nascia uma planta no chão”.*

(Waldeck Artur de Macedo)

RESUMO

Estudos recentes têm apontado que as mudanças climáticas em curso poderão resultar na redução de chuvas e aumento das secas no Nordeste brasileiro, agravando assim o quadro de vulnerabilidade hídrica, especialmente em áreas que já apresentam certo grau de susceptibilidade, como é o caso da Região do Baixo São Francisco (RBS). Visando contribuir com o enfrentamento destas questões, o objetivo principal deste trabalho foi caracterizar as variabilidades e tendências pluviais e fluviais na região fisiográfica do Baixo São Francisco. Para analisar as variabilidades e tendências pluviais utilizou-se uma série de dados mensais de precipitação de 1980 a 2013, cujos dados foram extraídos em 39 pontos da RBS, a partir do banco de dados de Xavier *et al.* (2016). Para analisar a variabilidade e as tendências fluviais do baixo curso do rio São Francisco foram utilizados dados mensais obtidos a partir do banco de dados da ANA (Agência Nacional de Águas) referentes ao período de 1982 a 2020, extraídos em três pontos (Piranhas/AL, Pão de Açúcar/AL, Propriá/SE). Dados de vazões mensais obtidos em relatórios da CHESF (Companhia Hidrelétrica do São Francisco) foram utilizados para avaliar a variabilidade fluvial em Sobradinho/BA no período de 2013 a 2018. As estatísticas descritivas foram calculadas e o teste não paramétrico de Mann-Kendall foi aplicado para identificar se há tendências na precipitação pluvial e nas vazões. A significância estatística adotada foi de 10%, 5% e 1%. Os resultados da análise das variabilidades pluviais mostraram que a região possui maiores quantitativos de precipitação de abril a julho, e menores de setembro a dezembro. Para a precipitação anual identificou-se acumulados que variam de 522 mm a 1.241 mm a oeste e sudeste da RBS, respectivamente. A análise dos anos padrão apresentou quantitativos de precipitação que vão de 230 mm a 1.100 mm no ano seco (1993), 230 mm a 1.390 mm no ano habitual (1984) e de 520 mm a 1.982 mm no ano chuvoso (1989). Por sua vez, a aplicação do teste de Mann-Kendall evidenciou tendências significativas de aumento da precipitação nas escalas anual (de 5,4 a 11,2 mm) e sazonal (3,2 a 5,2 mm). A análise da variabilidade fluvial mostrou vazões mais elevadas no período de janeiro a abril, com variação entre 2.040 e 2.470 m³/s, e vazões mais baixas de junho a agosto, com variação entre 1.520 e 1.727 m³/s. As vazões médias mensais apresentaram tendências significativas negativas, com quantitativos de redução mais elevados entre janeiro e abril. As vazões médias anuais também apresentaram tendências de redução, com quantitativos variando entre -35.84 m³/s e -42.53 m³/s. A análise da variabilidade interanual das chuvas e vazões revela que existe uma baixa participação das chuvas que ocorrem na RBS na formação das vazões no baixo curso do rio São Francisco, o que indica que as maiores contribuições às vazões deste trecho do rio são das regiões a montante. Por fim, foi verificado que o regime de vazões tem sido fortemente afetado pela regulação operada na barragem de Sobradinho, que tem culminado na redução dos períodos de cheias e de secas e também tem levado a reduções mais severas, conforme foi observado entre os 2013 e 2018, quando as vazões defluentes a Sobradinho foram continuamente rebaixadas, levando a uma série de impactos socioambientais na região do Baixo São Francisco.

Palavras-chave: chuva, vazão, bacia hidrográfica, semiárido.

ABSTRACT

RAINFALL AND RIVER VARIABILITY IN THE PHYSIOGRAPHICAL REGION OF BAIXO SÃO FRANCISCO

Recent studies have pointed out that ongoing climate changes could result in a reduction in rainfall and an increase in droughts in the Brazilian Northeast, thus aggravating the situation of water vulnerability, especially in areas that already present a certain degree of susceptibility, such as the region of Lower São Francisco (RBS). Aiming to contribute to tackling these issues, the main objective of this work was to characterize rainfall and river variability and trends in the physiographic region of Baixo São Francisco. To analyze rainfall variability and trends, a series of monthly precipitation data was used from 1980 to 2013, whose data were extracted from 39 points of the RBS, from the database of Xavier *et al.* (2016). To analyze the variability and fluvial trends of the lower course of the São Francisco River, monthly data obtained from the ANA (National Water Agency) database for the period from 1982 to 2020 were used, extracted at three points (Piranhas/AL, Pão de Açúcar/AL, Propriá/SE). Monthly flow data obtained from reports from CHESF (São Francisco Hydroelectric Company) were used to evaluate river variability in Sobradinho/BA in the period from 2013 to 2018. Descriptive statistics were calculated and the non-parametric Mann-Kendall test was applied to identify whether there are trends in rainfall and flows. The statistical significance adopted was 10%, 5% and 1%. The results of the analysis of rainfall variability showed that the region has higher amounts of precipitation from April to July, and lower amounts from September to December. For annual precipitation, accumulated amounts ranging from 522 mm to 1241 mm were identified to the west and southeast of the RBS, respectively. The analysis of standard years showed precipitation amounts ranging from 230 mm to 1100 mm in the dry year (1993), 230 mm to 1390 mm in the usual year (1984) and from 520 mm to 1982 mm in the rainy year (1989). In turn, the application of the Mann-Kendall test showed significant trends of increased precipitation on the annual (from 5,4 to 11,2 mm) and seasonal (3,2 to 5,2 mm) scales. The analysis of river variability showed higher flows in the period from January to April, with a variation between 2040 and 2470 m³/s, and lower flows from June to August, with a variation between 1520 and 1727 m³/s. Average monthly flows showed significant negative trends, with higher reduction amounts between January and April. Average annual flows also showed decreasing trends, with amounts varying between -35,84 m³/s and -42,53 m³/s. The analysis of the interannual variability of rainfall and flows reveals that there is a low participation of the rains that occur in the RBS in the formation of flows in the lower course of the São Francisco River, which indicates that the greatest contributions to the flows of this stretch of the river are from the regions amount. Finally, it was verified that the flow regime has been strongly affected by the regulation operated at the Sobradinho dam, which has culminated in the reduction of periods of floods and droughts and has also led to more severe reductions, as was observed between 2013 and 2018, when the flows flowing into Sobradinho were continuously lowered, leading to a series of socio-environmental impacts in the Baixo São Francisco region.

Keywords: rainfall, flow, hydrographic basin, semi-arid.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Localização da região fisiográfica do Baixo São Francisco.....	37
Figura 2. Variabilidade média mensal da precipitação pluvial na região do Baixo São Francisco.	45
Figura 3. Variabilidade sazonal da precipitação pluvial na região do Baixo São Francisco	47
Figura 4. Distribuição média anual da precipitação pluvial na região do Baixo São Francisco.	51
Figura 5. Variabilidade interanual da precipitação pluvial no Baixo São Francisco ..	52
Figura 6. Variabilidade espacial da precipitação pluvial em anos padrão (seco, habitual e chuvoso) no Baixo São Francisco.	53
Figura 7. Vazão média mensal afluente e defluente no reservatório de Sobradinho entre 1988 e 2010.	56
figura 8. Variabilidade das vazões médias mensais no município de Traipu/al entre 1931 e 2006.....	58
Figura 9. Variabilidade média mensal das chuvas e vazões entre 1982 e 2020 para as localidades de Piranhas/AL (a), Pão de Açúcar/AL (b) e Propriá/SE (c).....	59
Figura 10. Diagrama de caixas das vazões médias anuais no baixo curso do rio São Francisco no período de 1982 a 2020.	62
Figura 11. Variabilidade interanual das vazões no baixo curso do rio São Francisco entre 1982 e 2020.....	63
Figura 12. Evolução da vazão no posto de Juazeiro/BA entre 1931 e 2000.	64
Figura 13. Variabilidade interanual das chuvas e vazões no município de Piranhas/AL no período de 1982 a 2020.	69
Figura 14. Variabilidade interanual das chuvas e vazões no município de Pão de Açúcar/AL no período de 1982 a 2020.	69
Figura 15. Variabilidade interanual das chuvas e vazões no município de Propriá/SE no período de 1982 a 2020.....	70
Figura 16. Resoluções da ana que autorizaram a redução do patamar de defluência das hidrelétricas de Sobradinho e Xingó.	67
Figura 17. Variabilidade da vazão afluente, defluente e do nível do reservatório de Sobradinho entre 2013 e 2018.	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Estatísticas da precipitação acumulada anual da região do Baixo São Francisco. período de 1980 a 2013.	48
Tabela 2. Tendências sazonais para a precipitação pluvial na região do Baixo São Francisco.	49
Tabela 3. Vazões médias mensais nos municípios de Piranhas/AL, Pão de Açúcar/AL e Propriá/SE entre 1982 e 2020.	54
Tabela 4. Tendências das vazões médias mensais nos municípios de Piranhas/AL Pão de Açúcar/AL e Propriá/SE entre 1982 e 2020.....	56
Tabela 5. Estatísticas da vazão média anual referentes aos municípios de Piranhas/AL, Pão de Açúcar/AL e Propriá/SE no período de 1980 a 2013.	60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALTO SF – Alto São Francisco

ANA – Agência Nacional das Águas

BCSF – Baixo curso do rio São Francisco

BHSF – Bacia hidrográfica do Rio São Francisco

CASAL - Companhia de Saneamento de Alagoas

CBHSF – Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco

CHESF - Companhia Hidrelétrica do São Francisco

CNRH – Conselho Nacional de Recursos Hídricos

CODEVASF – Companhia de Desenvolvimento do Vale do São Francisco

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

CO₂ - Dióxido de carbono

DESO - Companhia de Saneamento de Sergipe

FAO - Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura

ICP - Índice de Concentração da Precipitação

IDH -Índice de Desenvolvimento Humano

IET - Índice de Estado Trófico

IPCC – Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas

MÉDIO SF - Médio São Francisco

MMA - Ministério do Meio Ambiente

NEB - Nordeste Brasileiro

NID - Nitrogênio Inorgânico Dissolvido

OMM - Organização Meteorológica Mundial

OMS - Organização Mundial da Saúde

ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico

ONU - Organização das Nações Unidas

PID - Fósforo Inorgânico Dissolvido

PNRH – Plano Nacional dos Recursos Hídricos

RBS - Região Fisiográfica do Baixo São Francisco

SUBMÉDIO SF - Submédio São Francisco

TSM – Temperatura da superfície do mar

UHE – Usina Hidrelétrica

ZCIT – Zona de convergência intertropical

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. OBJETIVOS	16
1.1.1 Objetivo geral.....	16
1.1.2 Objetivos específicos.....	16
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1. Ciclo hidrológico e reservas hídricas	17
2.2. Bacias hidrográficas como unidade de estudo e gestão do território.....	18
2.3. Bacia hidrográfica em estudos climáticos	19
2.4. Principais aspectos do rio São Francisco e sua área de drenagem	22
2.5. Disponibilidade hídrica e conflitos pelo uso das águas no rio São Francisco	24
2.6. Impactos da redução de vazões na região fisiográfica do Baixo São Francisco	26
2.7. O clima terrestre; variações, mudanças e repercussões socioambientais...	31
2.8. Tendências climáticas no Nordeste brasileiro.....	34
3. MATERIAIS E MÉTODOS	36
3.1. Caracterização da área de estudo	36
3.1.1. Localização do Baixo São Francisco.....	36
3.1.2. Aspectos socioeconômicos	37
3.1.3. Aspectos físico-ambientais.....	38
3.2. Procedimentos Metodológicos	39
3.2.1. Aquisição de dados.....	39
3.2.3. Representação da variabilidade espacial e temporal.....	41
4. RESULTADOS	44
4.1. Análise das variabilidades da precipitação pluvial na Região Fisiográfica do Baixo São Francisco	44

4.1.1. Variabilidades médias mensais da precipitação pluvial.....	44
4.1.2. Variabilidades sazonais da precipitação pluvial na região do Baixo São Francisco.....	46
4.1.3. Análise estatística dos totais anuais de precipitação pluvial na região do Baixo São Francisco	47
4.1.4. Variabilidade espacial das médias anuais na região do Baixo São Francisco	51
4.1.5. Variabilidade interanual da precipitação pluvial na região do Baixo São Francisco entre os anos 1980 e 2013	52
4.1.6. Análise da variabilidade em anos padrão (seco, habitual e chuvoso)	52
4.2. Análise das vazões no baixo curso do rio São Francisco.....	54
4.2.1. Variabilidade das vazões médias mensais.....	54
4.2.2. Variabilidade média mensal das chuvas e vazões no baixo curso do rio São Francisco	59
4.2.3. Variabilidade da vazão média anual no baixo curso do rio São Francisco.....	60
4.2.4. Variabilidade interanual das vazões no baixo curso do rio São Francisco	62
4.2.5. Variabilidade das vazões no baixo curso do rio São Francisco entre 2013 e 2018.	65
4.2.6. Variabilidade interanual das chuvas e vazões no baixo curso do rio São Francisco.	68
5. CONCLUSÕES.....	72
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	74

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, questões relacionadas às mudanças climáticas e seus impactos sobre os recursos hídricos tem sido motivo de grandes preocupações. Estudos coordenados pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2021) preveem que nas próximas décadas, a continuidade no aumento da temperatura terrestre causará alterações ambientais que poderão resultar na redução das chuvas em diversas regiões e excesso em outras. Por sua vez, tais mudanças na variabilidade das chuvas poderão afetar o regime fluvial de muitas regiões hidrográficas, a exemplo do que mostram os estudos do IPCC em seu relatório “Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability”, que preveem um aumento na magnitude das vazões no sudeste da América do sul e reduções na América Central, nos países dos Andes tropical, Andes Central, Região Amazônica e Nordeste do Brasil (NEB).

Neste contexto, o Nordeste brasileiro (NEB) destaca-se como uma das áreas que merece maior atenção diante dos riscos trazidos por possíveis mudanças no clima. Tendências significativas de aumento da temperatura média do ar já têm sido observadas em diversos locais da região (IPCC, 2014; CARVALHO *et al.*, 2019; CABRAL JÚNIOR; LUCENA, 2021; SANTOS *et al.*, 2022). Há também estudos que demonstram a existência de tendências variadas na precipitação, indicando um aumento das chuvas em alguns locais e redução em outros, além de casos em que as análises não mostram nenhuma tendência nas séries históricas (DA SILVA, 2016; MEDEIROS, 2018; HIERA *et al.*, 2019; POUSA *et al.*, 2019; CABRAL JÚNIOR e LUCENA, 2020; JUNQUEIRA *et al.*, 2020; BEZERRA *et al.*, 2021; SOUZA e NASCIMENTO, 2021; ALVES *et al.*, 2022; PAULO FERREIRA *et al.*, 2022). No que diz respeito as vazões fluviais, estudos de séries históricas referentes as ultimas décadas revelam tendências significativas de redução em importantes rios da região (MARTINS *et al.*, 2011; ALVES *et al.*, 2013; IPCC, 2014; LIRA E CARDOSO, 2018).

De uma maneira geral, estes estudos revelam um quadro preocupante, que necessita ser mais bem compreendido, uma vez que no NEB existem áreas que são conhecidamente susceptíveis as alterações climáticas, mas que foram pouco estudadas sobre estes aspectos. Este é o caso da RBS (Região do Baixo São Francisco) que compreende a área onde se localizam os menores índices pluviométricos da bacia do rio São Francisco, com destaque para o sertão do Baixo São Francisco, área que é periodicamente atingida por longos períodos de secas (JUNQUEIRA, 2002).

Nesta região, as águas do BCSF (baixo curso do rio São Francisco) são de extrema importância, pois garantem o suprimento hídrico regional, especialmente nos municípios próximos ao leito do rio. Há, contudo, um conflito pelo uso dessas águas que se intensificou nas últimas décadas e que tem agravado ainda mais o quadro hídrico regional. Para atender as demandas do setor elétrico, o regime de vazões do rio São Francisco teve que ser modificado pela CHESF (Companhia Hidrelétrica do São Francisco), o que levou a uma redução em sua magnitude e variabilidade em alguns trechos do rio, especialmente nas regiões do Submédio SF (Submédio São Francisco) e na RBS (MEDEIROS *et al.*, 2014; SOARES *et al.*, 2020; PEDROSA, 2023).

Entre os impactos socioambientais que o controle de vazões operado pela CHESF tem causado na RBS, destacam-se o desabastecimento hídrico em períodos de vazões muito baixas; a erosão e o assoreamento, que tem reduzido a largura efetiva do rio e comprometido a navegação em trechos a jusante da UHE de Xingó; o problema da salinização na região da foz em função da redução das cheias, que tem impactado as populações ribeirinhas; os impactos nas atividades pesqueiras devido a redução das áreas de captura e destruição de habitats como as lagoas marginais consideradas berçários de muitas espécies aquáticas; a grande redução da carga de material particulado em suspensão e de nutrientes; impactos na agricultura especialmente em áreas que dependem da sazonalidade das vazões para o cultivo, entre outros impactos (MARTINS *et al.*, 2011; MEDEIROS *et al.*, 2014; CUNHA, 2015; GONÇALVES, 2016).

Diante destas questões apresentadas, observa-se que a RBS é uma área que tende a sofrer um agravamento em seu quadro hídrico nos próximos anos caso as mudanças na climatologia pluvial previstas pelo IPCC se concretizem. Apesar dessa questão, não se observam atualmente estudos mais pontuais que tratem da problemática da variabilidade das chuvas e vazões na RBS conjuntamente, de forma a promover um conhecimento que sirva de apoio aos gestores e demais agentes que atuam na região. Sendo assim, visando contribuir com o enfrentamento destas questões, a pesquisa em questão teve como objetivo analisar as variabilidades e tendências significativas pluvial e fluvial na RBS.

O conhecimento sobre o regime pluvial é de extrema importância para o gerenciamento dos recursos hídricos, uma vez que sua variabilidade impacta na disponibilidade hídrica, no manejo da agricultura, na produção de energia, no abastecimento humano e animal, entre outros (CABRAL JÚNIOR; BEZERRA, 2018; GOMES; LIMA, 2021; MEDEIROS *et al.*, 2021; RODRIGUES *et al.*, 2021; SIILVA *et*

al., 2022; VALE *et al.*, 2022; SANTOS *et al.*, 2022). Neste sentido, a análise das variabilidades da precipitação na RBS aqui proposta atende a demanda por uma caracterização mais detalhada do regime pluvial regional, produzindo assim informações primordiais para a gestão hídrica nesta área.

Em relação à análise das tendências nas series de precipitação, salienta-se que as tendências significativas que vem sendo constatadas nos últimos anos no NEB não são todas de redução e nem estão por toda a parte. Existe, portanto, um quadro de tendências bastante heterogêneo que necessita ser mais bem compreendido, especialmente quanto a localização de áreas que possam vir a apresentar redução nas chuvas e conseqüentemente maiores riscos de comprometimento dos recursos hídricos.

No que diz respeito a análise da variabilidade e das tendências fluviais aqui proposta, salienta-se que existe a necessidade de se avaliar mais detalhadamente o comportamento das vazões do rio São Francisco nas últimas décadas, uma vez que sua dinâmica tem sido profundamente alterada em função da regulação realizada pelos reservatórios e usinas da CHESF, além do fato de que existem estudos demonstrando tendências significativas negativas e também projeções de redução destas vazões nas próximas décadas em virtude das mudanças climáticas (ALVES *et al.*, 2013; MEDEIROS *et al.*, 2014; LIRA E CARDOSO, 2018).

Em decorrência da ausência de dados pluviométricos que cubram a RBS de modo a permitir a elaboração de mapas de isoietas de chuvas por métodos de interpolação adequados, optou-se pela utilização dos dados disponibilizados em grade por Xavier *et al.* (2016), os quais cobrem o período de 1980 a 2013. Já no caso das vazões fluviais, foi possível trabalhar com dados da ANA, que cobrem o período de 1982 a 2020. Ressalta-se que essa diferença nas séries temporais não compromete os objetivos do estudo, pois, em um primeiro momento, as variabilidades fluviais e pluviais foram analisadas individualmente. Em uma etapa posterior, para analisar as variáveis de forma conjunta, foi possível utilizar dados de precipitação da ANA (Agência Nacional das Águas) referentes aos municípios de Piranhas/AL, Pão de Açúcar/AL e Propriá/SE, os quais possuem registros completos para o período de 1982 a 2020, igualando assim as series temporais das variáveis em estudo.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Analisar as variabilidades e as tendências significativas pluviiais e fluviais na região fisiográfica do Baixo São Francisco.

1.1.2 Objetivos específicos

- Caracterizar a variabilidade pluvial na escala mensal, sazonal, anual e interanual;
- Analisar diferentes padrões pluviiais (ano seco, habitual e chuvoso);
- Analisar as variações de vazões fluviais na escala mensal, anual e interanual;
- Analisar se há indícios de tendências nas séries temporais das chuvas e das vazões do baixo curso do rio São Francisco.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A primeira parte desta revisão trata de aspectos importantes da água; seu ciclo natural, sua distribuição no Brasil e no mundo e as características de seu uso enquanto recurso hídrico. No capítulo seguinte, para melhor caracterizar o objeto deste estudo são revisados alguns dos principais conceitos e características referentes a bacias hidrográficas bem como são apresentados alguns estudos que abordam a caracterização das chuvas nestes ambientes. Logo após, são apresentadas as principais características do rio São Francisco; da sua área de drenagem; da disponibilidade hídrica e dos conflitos pelo uso das águas que ocorrem neste rio. Em seguida são revisados alguns trabalhos que abordam os impactos socioambientais que vem ocorrendo na RBS em decorrência das reduções em suas vazões. Na sequência são apresentadas algumas definições de clima e alguns estudos que mostram impactos que vem sendo relacionados a mudanças climáticas recentes. Por fim, são apresentados uma série de trabalhos que tratam das tendências significativas na precipitação pluvial na região Nordeste do Brasil.

2.1. Ciclo hidrológico e reservas hídricas

As ocorrências, transformações e interações da água pela superfície do planeta Terra são descritas resumidamente através do conceito de ciclo hidrológico.

De acordo com Silveira (2009, p. 35) o ciclo hidrológico pode ser entendido como “fenômeno global de circulação fechada da água entre a superfície terrestre e a atmosfera, impulsionado fundamentalmente pela energia solar associada à gravidade e à rotação terrestre”.

Segundo Villella (1975) este fenômeno pode ser descrito tendo início com a evaporação das águas continentais e oceânicas. O vapor d’água é transportado pelo movimento das massas de ar e sob determinadas condições é condensado, formando nuvens, que podem resultar em precipitação pluvial. Ao retornar a superfície através da precipitação, parte da água fica temporariamente retida no solo, próxima de onde cai e logo retorna a atmosfera por evaporação e transpiração das plantas. Outra parte escoar na superfície do solo para os rios, enquanto que a outra parte penetra profundamente no solo, onde vai suprir o lençol d’água subterrâneo.

No que diz respeito a distribuição da água nos diferentes ambientes terrestres, estima-se que do total, 97,5%, é água salgada e apenas 2,5% é doce. Por sua vez, 68,7% da água doce estão armazenados nas calotas polares e geleiras e apenas 0,007% é encontrado em lagos, rios, açudes e outras formas mais acessíveis ao uso humano (Folegatti, 2001).

Bicudo (2010, p.16) aponta que “dentre as regiões do planeta que são privilegiadas do ponto de vista hídrico, América Latina e Caribe destacam-se com um escoamento superficial médio anual das precipitações de 13.120 km³ (30,8% do volume do planeta) e uma precipitação média anual de 1.500 mm (50 % superior à média mundial)”. Entre os países desta região, o Brasil é o que mais se destaca, abrigando em seu território 53% da água doce da América do Sul e 12% da vazão total mundial dos rios, ou seja, um total de 177.900 m³/s (Hirata, 2001).

Benetti e Bidone (2009) afirmam que nos dias atuais pode-se enumerar, entre outros, os seguintes usos múltiplos da água: abastecimento público; consumo industrial; matéria prima para a indústria, irrigação; recreação; dessedentação de animais; geração de energia elétrica; transporte; diluição de despejos, e preservação da flora e fauna (fonte proteica).

De acordo com a ANA (2017), os setores que representam as principais demandas por água no Brasil e seu respectivo consumo são a irrigação, com 745m³/s (67,2% do total); o uso animal, com 123m³/s (11,1%); a indústria, com 104,9m³/s (9,5%); o abastecimento urbano, com 97,7m³/s (8,8%); o abastecimento rural, com 27m³/s (2,4%); a mineração, com 8,9m³/s (0,8%); e o termelétrico, com 2,9m³/s (0,3%). Ao que se pode observar a irrigação é de longe a atividade mais consumidora, sendo 56,1% superior ao consumo animal, que é a segunda atividade mais consumidora de água.

2.2. Bacias hidrográficas como unidade de estudo e gestão do território

Existem diferentes conceitos e definições de bacia hidrográfica que ajudam na compreensão de sua estrutura e funções ambientais.

Christofoletti (1980) descreve a bacia hidrográfica como uma “área drenada por um determinado rio ou por um sistema fluvial, funcionando como um sistema aberto”.

Para Rodrigues e Adami (2011), a bacia hidrográfica deve ser entendida como um sistema que compreende um volume de materiais, predominantemente líquidos e sólidos, delimitado interna e externamente por todos os processos que, a partir da entrada de água pela atmosfera interferem no fluxo de matéria e energia de um rio ou de uma rede de canais fluviais.

Coelho Neto (2005) destaca que as bacias hidrográficas variam de tamanho e se articulam a partir de divisores de drenagens principais, que drenam a água em direção a um canal-tronco ou coletor principal, constituindo-se assim em um sistema de drenagem hierarquicamente organizado, que pode ser desmembrado em sub-bacias.

Faustino (1996) define as sub-bacias como áreas de drenagem dos tributários do curso d'água principal, cuja extensão varia entre 100 km² e 700 km². Para este autor, áreas de drenagem inferiores a 100 km² podem ser classificadas como microbacias, que são drenagens que ocupam um nível inferior ao das sub-bacias na hierarquia de uma bacia hidrográfica. Bertoni e Lombardi Neto (1993), entendem a microbacia como uma "unidade espacial mínima", definida a partir da classificação de uma bacia de drenagem em seus diferentes níveis hierárquicos, subdividindo-a até a menor porção possível.

Silva *et al.* (2003) destacam que, nas situações atuais, de grande pressão sobre o ambiente em função do crescimento populacional e do desenvolvimento urbano, a bacia hidrográfica tem se tornado importante unidade espacial utilizada para gerenciar atividades de uso e de conservação dos recursos naturais.

Botelho e Silva (2012) ressaltam que nas geociências, a bacia hidrográfica tem sido considerada uma célula básica de análise ambiental, uma vez que sua análise permite conhecer e avaliar diversos componentes, processos e interações ambientais.

Apesar dos estudos em bacias hidrográficas brasileiras terem ganhado visibilidade a partir da lei das águas de 1997, a literatura demonstra que sua utilização como unidade de análise ambiental no Brasil remete a experiências mais antigas. De acordo com Porto (2008), entre as principais experiências envolvendo a utilização de bacias hidrográficas como unidade de estudos ambientais no Brasil, destacam-se: a criação de comitês executivos nas bacias hidrográficas do Paraíba do Sul, do São Francisco e do Ribeira de Iguape entre o final dos anos 70 e início dos 80; a criação do primeiro Consórcio Intermunicipal no estado do Espírito Santo no início dos anos 80; a criação dos Comitês das Bacias Sinos e Gravataí no Estado do Rio Grande do Sul em 1988; a formação do Consórcio Intermunicipal das Bacias dos Rios Piracicaba e Capivari em 1989.

Outras experiências ocorreram de maneira fragmentada no território nacional, até que em 1997, a lei 9.433, conhecida como a “Lei das águas” (Brasil, 1997), oficializou a adoção da bacia hidrográfica como unidade territorial adequada para implementar o plano nacional de recursos hídricos (PNRH) no Brasil. Vale mencionar que esta lei teve um importante desdobramento no ano de 2003, quando o Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) criou a divisão hidrográfica nacional, que foi instituída pela resolução N° 32, de 15 de outubro de 2003, referenciando a base físico-territorial a 12 Bacias Hidrográficas: Amazônica, Tocantins Araguaia, Atlântico Nordeste Ocidental, Parnaíba, Atlântico Nordeste Oriental, São Francisco, Atlântico Leste, Atlântico Sudeste, Paraná, Paraguai, Uruguai e Atlântico Sul.

2.3. Bacia hidrográfica em estudos climáticos

Em anos recentes, a bacia hidrográfica continua sendo largamente utilizada como unidade de análise ou planejamento não só no âmbito de pesquisas ligadas a gestão governamental, como também, seu uso parte cada vez mais das pesquisas

desenvolvidas no âmbito dos cursos de graduação e pós-graduação nas universidades públicas nacionais. Neste capítulo serão destacados alguns estudos acadêmicos que utilizaram bacias hidrográficas como unidade de análises climáticas.

Baldo (2006) analisou a variabilidade pluviométrica e a dinâmica atmosférica na bacia hidrográfica do rio Ivaí-PR, no período de 1976 a 2001. Concluiu que para todas as escalas estudadas, a distribuição espacial da pluviosidade apresentou um padrão com os valores mais elevados a montante, devido o efeito orográfico e ao clima subtropical úmido predominante dessa porção, enquanto os menores valores foram registrados na porção a jusante, por estar numa área de baixas altitudes, situado numa faixa de transição do clima subtropical.

Em sua tese de doutorado, Cupolillo (2008) caracterizou a distribuição espacial e temporal das chuvas na bacia do rio Doce, localizada entre os estados de Minas Gerais e Espírito Santo. Além da distribuição das chuvas, o autor também analisou a atuação de mecanismos atmosféricos de grande escala através de mapas decendiais de linha de corrente. Como resultado foi observado um aumento da estação seca no médio e baixo rio doce. A análise decendial demonstrou um deslocamento do padrão pluviométrico no sentido de oeste para leste. Por fim, foi observada a existência de veranicos em fevereiro, os quais foram relacionados aos bloqueios atmosféricos atuantes nesta época do ano.

Amaral (2012) estudou a dinâmica das chuvas e sua influência na erosividade na bacia hidrográfica do rio Jordão-PR, no período de 1977-2007. A partir dos resultados obtidos o autor observou que os tipos de tempo geradores de chuva na área de estudo, nos meses de abril e dezembro estão relacionados a Frente Polar Atlântica e as áreas de instabilidade tropicais. Além disso foi constatado que a área está sujeita a dois tipos de processos erosivos determinados pela chuva e que estes estão sujeitos à dinâmica dos tipos de tempo a nível regional.

Souza (2013) analisou o regime pluviométrico na bacia hidrográfica do rio Ivinhema-Ms no período de 1977 a 2006. O rio Ivinhema é um afluente direto do Rio Paraná e sua bacia hidrográfica localiza se na porção centro-sul do estado do Mato grosso do Sul. A partir dos resultados, a autora observou a ocorrência de duas estações do ano bem definidas, uma seca e outra chuvosa. No setor sul da bacia foi observada uma tendência de aumento dos totais anuais e no setor norte uma tendência de diminuição das chuvas. Por fim a autora observou que os eventos

climáticos El Niño e La Niña se mostraram bastante atuantes na bacia, influenciando um total de 23 dos 30 anos da série histórica.

Zandonadi (2013) caracterizou a dinâmica temporal e espacial das chuvas na bacia hidrográfica do rio Paraná em sua porção brasileira. Para contemplar adequadamente a extensa área desta bacia, o autor utilizou dados provenientes de 95 estações pluviométricas distribuídas em quadriculas por toda a bacia. Como resultado primeiramente foi observado a presença de estiagens nas porções norte e nordeste para qualquer um dos anos-padrões, as quais o autor relaciona a ações mais intensas da massa tropical atlântica (MTA), que deixam o tempo seco e estável. Também foi observado que mesmo em épocas em que a frontogênese é pouco acentuada, às ações da Frente Polar Atlântica podem desestabilizar o tempo de uma dada região devido à formação de linhas de instabilidades.

Fontão (2014) estudou a distribuição temporal e espacial das chuvas e sua repercussão na vazão hídrica, na bacia hidrográfica do Pardo, no nordeste do Estado de São Paulo. Partindo dos principais episódios de cheias (“picos”) e estiagens, analisou as sequências rítmicas que precederam tais fenômenos na bacia, evidenciando sua gênese e os reflexos gerados na vazão hídrica dos pontos de análise selecionados. Seus resultados apontaram que as chuvas que ocorrem na bacia do Pardo estão em sua maioria associadas às correntes perturbadoras de sul, através da atuação dos sistemas frontais.

Rodrigues (2020) analisou a distribuição temporal e espacial das chuvas bacia de drenagem do Alto Curso do Rio Piranhas, localizada no sertão do estado da Paraíba. Para esta análise, o autor quantificou e especializou dados pluviais do período de 1996 e 2016, correlacionando-os com os sistemas produtores de chuva entre um ano mais chuvoso e outro seco, o que permitiu observar que o ano de 2008 foi o mais chuvoso e 2012 o mais seco da série. Também foi observado que a atuação da ZCIT (zona de convergência intertropical) varia interanualmente nos respectivos anos de acordo com a temperatura da TSM (temperatura da superfície do mar).

Morais e Abreu (2021) utilizaram dados de precipitação estimados por múltiplos satélites de monitoramento atmosférico (TRMM Multi-Satellite Precipitation Analysis-TMPA) referentes ao período de 1998 a 2019 para analisar a variabilidade da precipitação na bacia hidrográfica do rio Paraíba, localizada no Nordeste do Brasil. Estatísticas foram calculadas para obtenção das condições extremas, médias e variações das precipitações. Os resultados identificaram a ocorrência de períodos

de secas extremas em diferentes regiões nos anos 1998, 2007, 2012, 2015 e 2016, ao passo que os anos 2000, 2008, 2009 e 2011 foram extremamente chuvosos. Nenhum padrão espacial de distribuição da condição de precipitação pôde ser identificado ao longo da série histórica, o que para os autores, reforça a necessidade do estabelecimento de monitoramento contínuo da precipitação da BHRP, visando subsidiar programas de enfrentamento a eventos extremos, e ações de gerenciamento de recursos hídricos.

2.4. Principais aspectos do rio São Francisco e sua área de drenagem

Também conhecido como “rio da unidade nacional” ou “rio dos currais”, o rio São Francisco é o maior rio totalmente brasileiro, além de ser um dos mais importantes dos pontos de vista ecológico, econômico e social. Partindo de suas nascentes na região da Serra da Canastra em Minas Gerais, este rio percorre um total de 2.863 km, atravessando os mais diferentes ambientes até sua foz, que está localizada na divisa entre os estados de Alagoas e Sergipe (ANA, 2012).

Com uma área de aproximadamente 640.000 km², a bacia hidrográfica do rio São Francisco (BHSF) abrange atualmente um total de 507 municípios distribuídos em seis estados (Bahia - 48,2% da área de bacia; Minas Gerais - 36,8%; Pernambuco – 10,9%; Alagoas – 2,2%; Sergipe – 1,2%; Goiás – 0,5%) e no Distrito Federal (0,2%) (CBHSF, 2016).

A vazão média natural do rio São Francisco corresponde a 2.846 m³/s e a vazão média de estiagem natural (Q95) a 852 m³/s. A vazão média mensal pode variar de 1.077 m³/s a 5.290 m³/s ao longo do ano, sendo que os menores valores de descarga costumam ser observados entre os meses de setembro e outubro e as maiores descargas são observadas em março (ANA, 2012).

De acordo com Pereira *et al.* (2007) a BHSF possui 36 afluentes mais importantes, dentre os quais, apenas 19 são perenes. As maiores proporções de contribuição que o rio São Francisco recebe de seus afluentes em termos de vazão são dadas pelos rios Paracatu (20,8%), Rio das Velhas (13,4%), Grande (13,2%), Urucuia (11,2%), Corrente (10 %), Paraopeba (9,1%), Pará (8,1%), Carinhanha (6,5%), Abaeté (3,5%), Verde Grande (1,6%) e Pandeiros (1,1%).

Atualmente, a BHSF é dividida em quatro regiões fisiográficas: o Alto São Francisco (Alto SF), o Médio São Francisco (Médio SF), o Submédio São Francisco (Submédio SF) e o Baixo São Francisco (RBS).

O Alto SF compreende o trecho que parte da nascente do rio São Francisco até a cidade de Pirapora, MG. Abrange uma área de 235.635 km² (16% da área da bacia), que se estende por parte dos estados de Minas Gerais, Bahia, Goiás e Distrito Federal, onde estão localizados um total de 244 municípios (CBHSF, 2016). O clima predominante nessa região é do tipo Aw, quente e úmido com chuvas de verão (MMA, 2016). O Alto SF possui as maiores vazões específicas da bacia devido aos elevados quantitativos de precipitação que ali ocorrem, que são da ordem de 1.800 mm. Entre os principais afluentes do rio São Francisco nessa região destacam-se os rios São Miguel, Ribeirão Santana, Pará, Paraopeba, Ribeirão da Extrema, Grande, Samburá, Ajudas, Bambuí, Ribeirão Jorge Grande, Marmelada, Indaiá e Borrachudo (CBHSF, 2016; PEREIRA *et al.*, 2007).

O Médio SF compreende o trecho que vai de Pirapora/MG a Remanso/BA. Abrange uma área de 266.972 km² (63% da área da bacia), que se estende por parte dos estados de Minas Gerais e Bahia, onde estão localizados um total de 92 municípios (CBHSF, 2016). O clima semiárido é predominante em quase toda essa região, com exceção de uma estreita porção a oeste, submetida a um clima semiúmido no domínio do Cerrado. A precipitação pluvial alcança valores inferiores a 500 mm/ano ao norte, ou superiores a 1.250 mm no oeste da bacia (Arruda *et al.*, 2015). Entre os principais afluentes da região do Médio SF, destacam-se os rios Paracatu, Urucuia, Pandeiros, Verde Grande, Carinhanha, Corrente e Grande (MMA, 2016).

O Submédio SF compreende o trecho que vai de Remanso/BA até Paulo Afonso/BA. Abrange uma área de 110.446 km² (17,3 % da área total da bacia) que se estende por parte dos estados do Pernambuco, Bahia e Alagoas, onde se localizam 92 municípios (CBHSF, 2016). A maior parte dessa área é ocupada por vegetação de Caatinga Hiperxerófila, com formações mais densas nos relevos ondulados do norte e na zona de entalhe do Rio São Francisco. O clima é caracterizado como quente semiárido mediano, com sete a oito meses secos e regime de chuvas de outono - inverno, com total anual de cerca de 550 mm concentrados entre os meses de novembro a março. Entre os principais afluentes da região do Submédio SF, destacam-se os rios Salitre, rio do Pontal, rio das Garças, Curaçá, Brígida, Riacho Terra Nova, Macururé, Pajeú/, Moxotó e Curituba. (SÁ *et al.*, 2009; MMA, 2016).

A RBS está localizada no trecho que vai de Paulo Afonso/BA até a foz do rio São Francisco. Abrange uma área de 25.523 km² (4,0 % da área total da bacia) que se estende por parte dos estados de Alagoas, Sergipe, Pernambuco e Bahia, onde se localizam 78 municípios (CBHSF, 2016). Sua área divide-se nos climas semiárido quente, que predomina de Piranhas/AL a Traipu/AL, e tropical semiúmido, que predomina de Propriá/SE, à foz do Rio São Francisco. O regime pluviométrico é caracterizado pela ocorrência de uma estação chuvosa entre os meses de maio a julho e um período seco de quatro meses na faixa litorânea e sete meses na região do semiárido. A precipitação média é de 1.300 mm na faixa litorânea e 600 mm na porção localizada no semiárido. Entre os afluentes que desaguam no BCSF, apenas os rios Boacica, Perucaba, Piauí, Itiúba, Jacaré, Betume e Pilões dispõem de água durante praticamente todos os meses do ano (JUNQUEIRA, 2002; MMA, 2016).

2.5. Disponibilidade hídrica e conflitos pelo uso das águas no rio São Francisco

A BHSF corresponde por cerca de 70% da oferta de águas superficiais do Nordeste brasileiro, oferta essa que é irregularmente distribuída entre as diferentes regiões desta bacia (CBHSF, 2016).

Avaliada em sua totalidade, a bacia apresenta boa disponibilidade hídrica per capita, com trechos com mais de 10.000 m³/hab/ano. Esse alto quantitativo contrasta com o existente na região semiárida, onde há trechos com disponibilidade per capita inferior ao que a ONU indica como suficiente ao pleno desenvolvimento humano, de 2.000 m³/hab/ano (ANA, 2012).

Além disso, estudos mostram que houve um crescimento da demanda total de recursos hídricos na BHSF de 165,8 m³/s em 2000 para 309,4 m³ /s em 2010, ou seja, um crescimento de 87% em 10 anos, o qual acredita-se estar associado em grande parte ao aumento da demanda de água para os perímetros irrigados existentes em toda a BHSF. Exemplo disso é que a demanda de recursos hídricos pela agricultura irrigada saltou de 114 m³ /s para 244,4 m³ /s entre os dois períodos de avaliação, um aumento de 144% (CBHSF, 2016).

Outro fato preocupante é que enquanto a demanda por água cresce em toda a bacia, a magnitude das vazões do rio São Francisco vem se reduzindo nos últimos anos, aumentando assim a vulnerabilidade hídrica em diversas áreas. Estudos mostram que desde o final da década de 1970 houve uma queda sistemática nas

vazões do rio São Francisco, a qual vem sendo atribuída especialmente ao uso de água na agricultura, ao aproveitamento energético, entre outros (SAMPAIO, 2001; FONTES *et al.*, 2003; MARTINS *et al.*, 2011).

O manual de usos consuntivos da água no Brasil (ANA, 2019) mostra que recentemente, as maiores retiradas de água no rio São Francisco são para a irrigação agrícola, a qual corresponde a um percentual de 77,2%. Bem abaixo deste percentual estão as retiradas para o abastecimento humano (10,1%), uso animal (4,1%), mineração (3,3%), indústria (2,9%), abastecimento rural (1,3%), e telemétrica (1%). De acordo com Pedrosa (2023) estes números mostram a forte vocação agrícola da região, com destaque para os polos de irrigação de Nilo Coelho/PE, de Jaíba/MG e da região oeste do estado da Bahia dos rios Carinhanha, Correntes e Grande, afluentes da margem esquerda do rio São Francisco.

Ao comparar os resultados do balanço hídrico superficial para a BHSF do Plano de Recursos Hídricos de 2016 com os resultados do Plano de Recursos Hídricos de 2004, o CBHSF avaliou que a situação hídrica piorou em diversas regiões da bacia. Entre as áreas que apresentaram tal piora, destacam-se as sub-bacias dos afluentes mineiros do rio São Francisco localizados no entorno da represa de Três Marias; os rios de Janeiro e Formoso; o alto rio Preto; os rios Paracatu, Jacuí, Urucuia, Pandeiro, Pardo, Manga, Carinhanha e Corrente; o alto, médio e baixo rio Grande; o rio Curitiba; e o alto rio Ipanema (CBHSF, 2016).

Para além dos problemas relacionados a redução da oferta hídrica, a distribuição das águas do São Francisco tem gerado conflitos entre usuários em todas as regiões da bacia. De acordo com o CBHSF (2016) nas regiões do Submédio SF e do Baixo São Francisco evidenciam-se conflitos entre a forma de operação das barragens da CHESF para geração de energia com demais setores usuários (abastecimento humano, navegação, pesca, irrigação, piscicultura, agricultura de vazante e turismo). No médio SF, os conflitos mais comuns se dão entre a irrigação (uso indiscriminado das águas e manejo inadequado do solo) com os demais usos. Por fim, no Alto SF os conflitos se dão entre a operação da barragem de Três Marias e os usos para o turismo, esporte, lazer, abastecimento, irrigação, navegação, pesca, entre outros.

Diante destes fatos, observa-se que o uso das águas para geração de energia é o mais conflituoso, pois o controle de vazões necessário ao pleno funcionamento do sistema CHESF tem causado profundas alterações no regime fluvial deste rio (PEDROSA, 2023). De acordo com Martins (2011) as modificações mais

significativas no regime de vazões do rio São Francisco ocorreram mediante o início da operação dos complexos de Três Marias (1952) e Sobradinho (1979), localizados respectivamente nos estados de Minas Gerais e Bahia, que têm as funções de geração de energia e controle de cheias.

2.6. Impactos da redução de vazões na região fisiográfica do Baixo São Francisco

A instalação das UHEs ao longo do rio São Francisco tem causado profundas alterações no regime de vazões deste rio, principalmente nas regiões fisiográficas do Submédio e Baixo São Francisco, onde as variações nas vazões geradas por períodos de estiagens ou cheias foram praticamente eliminadas nas últimas décadas (Gondim *et al.*, 2012). Como consequência dessa mudança houve uma significativa redução na magnitude das vazões em todo o BCSF, o que tem contribuído para o surgimento de uma série de impactos socioambientais nesta área (MARTINS *et al.*, 2011; GONDIM *et al.*, 2012; SOARES *et al.*, 2020; PEDROSA, 2023).

Um dos graves problemas gerados pela restrição das vazões na RBS é o desabastecimento hídrico, que ocorre principalmente em função do mau funcionamento dos equipamentos de captação dos municípios em períodos de vazões muito baixas.

Em 2013, logo nos primeiros meses de vigência do período de restrições que rebaixou as vazões defluentes da UHE Sobradinho do patamar de 1.300 m³/s para 1.100 m³/s, a CHESF recebeu notificações de diversos municípios que alegavam problemas na captação. Conforme consta no relatório de acompanhamento mensal (CHESF, 2013), em Propriá/SE, as baixas vazões levaram a paralização dos sistemas de bombeamento da CODEVASF nos perímetros de irrigação localizados, Cotinguiba/Pindoba e Betume. Neste caso foi necessário realizar a dragagem dos canais de entrada das estações de bombeamento destes municípios bem como foi preciso retornar temporariamente ao patamar de vazão de 1.200 m³/s até que fossem tomadas as medidas para normalizar a situação. Além disso, a queda no nível d'água neste município dificultou a operação no ponto de captação da Companhia de Saneamento de Sergipe (DESO) responsável pelo abastecimento da cidade de Aracaju/SE.

No município de Pão de Açúcar/AL, a Companhia de Saneamento de Alagoas (CASAL) informou que duas das três bombas existentes para captação apresentaram problemas. Em Penedo/AL foram registrados problemas no funcionamento de três bombas e o abastecimento teve que ser improvisado com

duas bombas menores. No morro do Gaia em São Brás/AL, a captação da CASAL vinha operando com problemas e a situação se agravou quando a defluência passou para 1.100 m³/s. Em dezembro de 2015, a CASAL chegou a solicitar recursos financeiros junto a CHESF para a construção de novas estruturas e adequações nas captações de água do Rio São Francisco devido à redução da vazão de restrição mínima no rio. Em fevereiro de 2016 o município de Propriá/SE voltou a ter problemas na captação da adutora da DESO, que abastece a cidade de Aracaju.

A partir de 2020, embora as vazões defluentes da UHE de Xingó tenham retornado ao patamar mínimo acima de 1300 m³/s, em diversas ocasiões foram praticados rebaixamentos temporários abaixo de 1000 m³/s que voltaram a impactar as condições socioambientais no BCSF (Nascimento *et al.*, 2013; CHESF, 2013; CHESF, 2015; CHESF, 2016).

Outro grave problema relacionado as mudanças nas vazões no BCSF é a erosão marginal fluvial. De acordo com Cunha (2011) rios que sofreram o barramento de suas águas costumam apresentar processos erosivos em suas margens, que podem levar a um complexo reajuste na morfologia do canal, com mudanças na largura, profundidade do nível do fundo do canal e como efeito secundário, mudança no gradiente do rio.

O processo erosivo que ocorre no perímetro irrigado Cotinguiba/Pindoba é um exemplo de como a redução das vazões do rio São Francisco tem influenciado e intensificado tal problema. Fontes *et al.* (2003) observa que os processos erosivos nesta área já existiam antes da implantação da barragem de Sobradinho, no entanto, houve uma intensificação deste processo nos anos que se seguiram ao início das atividades desta barragem, tendo ocorrido uma piora no final da década de 1990, quando a regulação das vazões se intensificou com o início das atividades das hidrelétricas de Itaparica (1988) e Xingó (1994).

Outros focos de erosão marginal foram registrados ao longo do BCSF nos últimos anos. No final da década de 2010, haviam 72 focos de erosão marginal ativos entre Pão de Açúcar/AL e a foz, com maior concentração no trecho entre Própria/SE e a foz, onde havia 57 focos, correspondendo a 29,9 km sob erosão na margem direita e 17,8 km na margem esquerda (CUNHA, 2011).

O sistema estuarino do rio São Francisco também tem apresentado processos erosivos relacionados a regularização da vazão, conforme foi constatado por Cunha *et al.* (2018). Os referidos autores observaram que a regularização causou uma aceleração da erosão marginal no estuário, contribuindo assim para o assoreamento, formação de bancos de areia e transformações na foz e litoral adjacente, o que gerou

sérias implicações socioambientais, a exemplo o incidente da população do povoado Cabeço, no município de Brejo Grande/SE, onde a intensidade desse processo levou ao êxodo dessa população para áreas mais ao interior do estado.

Os processos erosivos têm contribuído para o assoreamento do BCSF e conseqüentemente tem afetado a navegação em diversos trechos, conforme é mostrado pelo relatório técnico da campanha de avaliação das mudanças socioambientais decorrentes da regularização das vazões no baixo SF (NASCIMENTO *et al.*, 2013). Em 2013 foram observados problemas de navegabilidade ligados ao assoreamento entre a ponta da Lagoa Comprida e o extremo norte do povoado Munguengue/AL; na localidade de Oiti, onde havia um grande banco de areia com extensas áreas secas; da jusante do rio Traipu até o través da localidade do Buraco da Maria Pereira/SE, onde foi verificado um grande número de bancos de areia cobertos por vegetação estabilizada, além de bancos baixos submersos; acima do Buraco da Maria, alcançando o través do porto de cima de Gararu/SE, onde o eixo da calha e boa parte da metade até a margem alagoana apresentavam grandes bancos de areia; no trecho da Fazenda Jacobina (Ilha dos Prazeres) onde foi registrado um trecho de quase sete quilômetros assoreado; na boca do grande saco (povoado do município sergipano do Porto da Folha) e a Barra do Ipanema (povoado alagoano que pertence a Belo Monte, na foz do rio Ipanema); a montante da ilha dos Prazeres, descendo por toda a margem alagoana e a montante do porto da balsa do povoado Barra do Ipanema, onde foi verificado um complexo sistema de bancos de areia a partir da margem norte e chegando além do eixo do rio.

Ao longo dos anos de severa restrição das vazões de Sobradinho (2013 a 2019) os relatórios mensais de acompanhamento da CHESF também registraram uma série de ocorrências relacionadas a dificuldades enfrentadas pela navegação em trechos do BCSF. Logo no início do período de restrições, em agosto e setembro de 2013, a empresa de navegação ICOFORT chegou a fazer 10 solicitações de elevação das vazões, das quais quatro foram prontamente atendidas e as outras 6 foram canceladas pela empresa. Entre outubro e novembro foram mais 12 solicitações 7 atendidas e 5 canceladas. Em junho de 2014, a ICOFORT informou a CHESF sobre a paralisação temporária da navegação na hidrovia do Rio São Francisco, motivada pelo estágio de assoreamento e pela redução significativa do volume de águas, impossibilitando a navegação. Em janeiro de 2015 a Sociedade Socioambiental do Baixo São Francisco – Canoa de Tolda, comunicou a Chesf problemas de navegação

que levaram ao encalhe da sua embarcação (CHESF, 2013; CHESF, 2014; CHESF, 2015).

Na região próxima a foz do rio São Francisco, a redução de vazões tem comprometido a qualidade das águas devido a sua influência no avanço da cunha salina. De acordo com Medeiros *et al.* (2014), em condições naturais, o tipo e a extensão da intrusão salina em um ambiente estuarino dependem de forçantes oceanográficas (marés, ondas, ventos), da geomorfologia do estuário e do fluxo fluvial. Cavalcante *et al.* (2017) constatou que em condições de maior vazão no rio São Francisco, a cunha salina apresenta menor alcance, com uma diferença de aproximadamente 1,2 km em uma variação de vazão de $1.100 \text{ m}^3/\text{s}$ para $900 \text{ m}^3/\text{s}$.

Em decorrência do avanço da cunha salina em trechos a montante da foz do rio São Francisco, alguns municípios tem apresentado valores elevados de salinidade em suas águas, o que as torna impróprias para utilização, conforme foi constatado por Cruz *et al.* (2020). No trecho que vai de Traipu/AL a Penedo/AL, os autores observaram águas com salinidade inferior a 0,5%, o que indica boa qualidade da água em relação ao parâmetro salinidade, estando estas águas classificadas como de nenhuma restrição ao seu uso para fins de irrigação de culturas e viável para o consumo humano. A jusante destes pontos, nos municípios de Piaçabuçu/AL e Brejo Grande/SE, as águas superficiais e profundas apresentaram severa a moderada restrição para uso em irrigação de culturas agrícolas devido a sua condutividade elétrica (CE) média. Já as concentrações de sódio em ambos os municípios apresentou valores acima de 0,5%, o que atesta a impossibilidade de uso dessas águas para abastecimento humano segundo a resolução do Conama nº 357, de 17 de março de 2005.

Outro importante fator afetado pelo controle de vazões é a carga de nutrientes. Medeiros (2014) observou que a carga de NID (nitrogênio inorgânico dissolvido) no rio São Francisco sofreu uma diminuição drástica nas últimas décadas, passando de aproximadamente $69,6 \times 10^3 \text{ t/ano}$ nos anos de 1984-1985 para $4,1 \times 10^3 \text{ t/ano}$ no ano de 2001. Já o fluxo anual de silicato também sofreu redução de 31%, após a construção do sistema de barragens em cascata.

Ao avaliar a variação temporal da carga de nutrientes e clorofila no BCSF para os anos de 2008, 2009 e 2010, Santos (2020) verificou uma redução das cargas específicas de NID (nitrogênio inorgânico dissolvido) e PID (fósforo inorgânico dissolvido) a níveis abaixo de rios tropicais que já possuíam cargas específicas mais baixas. De acordo com o autor, as maiores extrapolações acima da

média anual de nitrato ocorreram nos meses de maiores vazões, demonstrando haver relação entre aumento da vazão e elevação da carga mensal. Os valores obtidos também mostram que o IET (Índice de Estado Trófico) nos três anos em estudo aponta o grau de trofia no rio São Francisco para ultraoligotrófico (IET < 47) sendo que, em 2008 foi de 39,4, em 2009 foi de 39,1 e 2010 foi de 39,5.

As mudanças nas vazões e conseqüentemente na qualidade das águas também estão entre as causas da redução de algumas espécies da ictiofauna do BCSF, conforme é mostrado por Soares *et al.* (2020). Os referidos autores constataram que recentemente houve uma redução de espécies nativas no município de Penêdo/AL, com destaque para o desaparecimento das curimatãspacús, diminuição dos piaus, queda na capturas da pilombeta (espécie que já foi a terceira mais capturada na mesorregião de Penedo).

Santos *et al.* (2016) realizou um levantamento ictiofauna em algumas localidades do BCSF (Pão de Açúcar/AL, Traipu/AL, Ximará/AL e Ilha das Flores/SE) utilizando diferentes artes de pesca para amostragem. A partir dos resultados os autores observaram uma redução no número e abundância de espécies migradoras, a qual acredita se estar relacionada à diminuição do fluxo como também com a perda de conectividade a partir da formação de barreiras representadas pela construção das diferentes barragens a montante. Algumas espécies migradoras que são intolerantes a alterações ambientais, como salminnus franciscanus (dourado), pseudoplatystoma corruscans (sorubim), conorhynchos conirostris (pirá) e brycon lundii (matrinchá) não foram registradas neste estudo. Já as espécies tolerantes, como as tilápias (oreochromis sp. e tilapia sp.), parivivas (poecilia reticulata, p. vivípara e pamphoricthys hollandi) e outras consideradas moderadamente tolerantes como a chira (prochilodus argenteus) e os piaus (leporinus spp.) foram registradas em abundância.

As alterações no regime de vazões do rio São Francisco também trouxeram impactos a tradicional rizicultura que ocorria até a década de 1970 em municípios a jusante de Piranhas/AL, no BCSF. Segundo Oliveira *et al.* (2005), as cheias do rio São Francisco determinavam o calendário agrícola do arroz de forma que;

Antes da chegada dessas cheias, geralmente entre dezembro e janeiro, as terras das várzeas eram preparadas. Nesse período, as águas inundavam as várzeas, aportando os sedimentos em suspensão que adubavam as terras. As sementeiras, instaladas nas partes mais elevadas, eram preparadas de maneira a fornecer as plantas necessárias ao transplântio. Este começava logo no início da estação das chuvas, em março, ocasião em que as águas das cheias diminuía progressivamente, porém as chuvas de março a agosto asseguravam a continuidade do suprimento hídrico (Oliveira *et al.*, 2005, p. 10.894).

Com a eliminação das cheias no BCSF, as várzeas deixaram de ser inundadas, e assim os métodos tradicionais de plantio do arroz tiveram de ser substituídos por formas mais modernas. Neste contexto, ao longo das décadas de 1970 e 1980 foram realizadas intervenções estatais através da CODEVASF (Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba) que promoveram a implantação de perímetros irrigados, porém, limitando-se à irrigação das grandes várzeas de monocultura do arroz, onde a produção tem crescido nas últimas décadas, especialmente nos municípios de Propriá/SE, Ilha das Flores/SE, Japoatã/SE, Pacatuba/SE e Telha/SE (OLIVEIRA *et al.*, 2005). No que diz respeito a produção tradicional familiar, Araújo e Aguiar Netto (2016) observaram que a decadência completa dessa forma de produção ocorreu após a implantação das UHE de Xingó (1994), quando a rizicultura tradicional chegou ao fim nos municípios de Porto da Folha/SE (1995), Belo monte/AL (1997), Traipu/AL (1997), Canhoba/SE (1999); Amparo do São Francisco /SE (2000), Gararu/SE (2001), Santana do São Francisco/SE (2011) e Piaçabuçu/AL (2012).

2.7. O clima terrestre: variações, mudanças e repercussões socioambientais

De acordo com Ayoade (2013) o tempo atmosférico é o estado médio da atmosfera numa dada porção de tempo e em determinado lugar. Por sua vez, o clima é a síntese do tempo num dado lugar durante um período de aproximadamente 30-35 anos.

De acordo com Sanches (2020) variações climáticas ocorrem em escalas de tempo que variam de anos a períodos glaciais e a idade da Terra.

Ayoade (2013) afirma que o clima pode apresentar variações que caracterizam tendências e ciclos climáticos. Quando ocorrem por um longo período de tempo, as flutuações climáticas passam a provocar uma mudança no tipo de clima predominante sobre determinada área, caracterizando assim uma legítima mudança climática.

Sanches (2020) chama a atenção para a distinção entre variabilidade climática e mudança climática. De acordo com o autor, enquanto variabilidade se refere a oscilações, ou padrões de flutuações acerca de algum valor médio especificado, o termo mudanças se refere a tendências seculares que apresentam um deslocamento com relação à média.

Nos últimos anos, o IPCC (Painel intergovenamental sobre mudanças climáticas) tem apresentado uma série de evidencias científicas relacionadas as

transformações que o sistema climático global vem sofrendo em consequência das altas emissões CO₂ e outros gases do efeito estufa liberados pelas atividades humanas. Estima-se que desde meados do século XVIII até os dias atuais, o aumento de CO₂ na atmosfera elevou a temperatura do ar no planeta Terra em 1,07°C, e que tal aumento continuará, e será de mais 1,5°C nas próximas duas décadas. Caso as emissões continuem em um patamar elevado, a previsão é de que este aumento na temperatura possa alcançar 5,7°C até 2100 (IPCC, 2021).

Conforme vem sendo apurado nos últimos anos, essas alterações na temperatura já são responsáveis por uma série de catástrofes e prejuízos socioeconômicos no mundo todo. Dados apresentados pelo World Meteorological Organization, (WMO, 2021) mostram que entre 1970 e 2019 as adversidades climáticas foram responsáveis por um total de 11.072 desastres, que somaram 2,06 milhões de mortes e US\$ 3,6 trilhões em perdas econômicas. Neste contexto, secas e inundações foram considerados os eventos mais mortíferos e as tempestades foram os eventos de risco mais caros.

Os impactos das mudanças climáticas na saúde alimentar das populações também tem sido motivo de grandes preocupações nos últimos anos. De acordo com Hallegatte *et al.* (2014) é muito provável que os esforços de redução da pobreza sejam afetados pelas mudanças climáticas por meio de impactos diretos sobre a população pobre e afetando o crescimento econômico, entre outros fatores que condicionam a redução da pobreza.

No ano de 2018, o relatório do FAO (Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura) destacou que eventos relacionados ao clima foram responsáveis por um aumento de 25% da fome aguda e crônica no mundo em relação aos dois anos anteriores.

Alpino *et al.* (2022) revisou a literatura científica recente que trata dos impactos das mudanças climáticas na saúde alimentar. Ao montar um panorama geográfico das publicações em análise, a autora observou um predomínio de estudos na África e Ásia, onde a desigualdade e pobreza elevam o grau de vulnerabilidade social ao clima. Nestes países, as mudanças climáticas têm sido relacionadas a uma importante redução na disponibilidade hídrica, o que consequentemente tem levado a diminuição dos rendimentos das plantações, especialmente de arroz, trigo e milho, além de causar a diminuição da área e da qualidade das terras cultiváveis, afetando a produção de alimentos pesqueiros e a pecuária.

Em anos recentes os pesquisadores também tem observado que as mudanças climáticas vêm impactando na incidência de doenças infecciosas pelo mundo. Barcellos *et al.* (2009) discute os riscos relacionados especialmente as doenças de veiculação hídrica, como a leptospirose, as hepatites virais, as doenças diarreicas, que tendem a se alastrar em um cenário de aumento na ocorrência de eventos que levam a enchentes, alagamentos e inundações.

Zeppo (2021) realizou uma revisão de literatura em um conjunto de 81 trabalhos que tratam da relação entre as doenças infecciosas relatadas pela Organização Mundial da Saúde (OMS) e as alterações climáticas e ambientais. Os resultados demonstram que existe um padrão quanto ao surgimento e ao reaparecimento de doenças infecciosas que indicam o vínculo delas com a pressão das mudanças climáticas e ambientais sobre o meio, especialmente em regiões mais vulneráveis da Ásia e da África.

Mora *et al.* (2022) estimou que que 58% das doenças infecciosas enfrentadas pela humanidade foram em algum momento agravadas por mudanças climáticas. A mesma autora também identificou 3.213 exemplos de casos em que a piora de doenças esteve relacionada aos eventos de alteração no clima.

Por fim, pesquisadores também têm observado impactos das mudanças climáticas sobre o setor de energia, em especial o setor das energias renováveis, que são dependentes dos recursos naturais como água e vento, por exemplo.

Silveira (2018) considera a matriz energética brasileira insustentável, uma vez que o país é altamente dependente da energia elétrica, a qual apresenta alta vulnerabilidade aos efeitos das mudanças climáticas.

Ao revisar a literatura sobre o tema de impactos de mudanças climáticas sobre o setor de energia, Huback *et al.* (2016) buscou um recorte analítico com foco no Brasil, nos Estados Unidos e na União Europeia. Conforme as obras analisadas, o autor concluiu que as alterações na temperatura e precipitação previstas principalmente para o norte e nordeste brasileiro (IPCC, 2014) podem afetar a vazão dos rios que abastecem as hidrelétricas nestas regiões. Já no caso dos Estados Unidos e da União Europeia, o autor observou que além da redução do potencial hidrelétrico, a redução da disponibilidade hídrica também afeta a demanda utilizada para o resfriamento das usinas termelétricas.

2.8. Tendências climáticas no Nordeste brasileiro

As previsões de alterações no clima no NEB (IPCC, 2014) que poderão causar o aumento da temperatura, redução das chuvas em alguns locais e aumento em outros, tem levado pesquisadores a verificar as tendências climáticas em diferentes localidades da região. Este capítulo faz uma revisão de alguns trabalhos que utilizaram o teste estatístico não paramétrico de Mann Kendall para avaliar tendências na precipitação pluvial e temperatura do ar em diferentes partes do NEB, trazendo resultados que ajudam a compreender o quadro de alterações no clima desta região.

Costa *et al.* (2015) analisou as tendências em extremos de precipitação sobre todo o Nordeste do Brasil para o período de 1961 a 2011. O estudo se baseou na aplicação do teste não paramétrico de Mann-Kendall a dados diários de precipitação, distribuídos em 193 postos pluviométricos espalhados por toda a região. Os resultados apontaram a existência de tendências significativas de redução na precipitação diária em torno de 0,16 mm/dia/ano para o período menos chuvoso e 0,64 mm/dia/ano para o período chuvoso. De acordo com os autores, essas tendências indicam um aumento na intensidade das secas e diminuição dos eventos de precipitação intensa ao longo dos anos.

Medeiros (2018) analisou as tendências e padrões climáticos (precipitação e temperatura do ar) na mesorregião do sertão paraibano entre 1912 e 2012. Para realizar tal análise, o autor aplicou o teste não-paramétrico de Mann-Kendall às séries de dados mensais, trimestrais, semestrais e anuais obtidas em cinco estações meteorológicas. Os resultados mostraram que quatro das cinco estações apresentaram tendência significativa de aumento para a precipitação pluvial, especialmente na escala anual, com incrementos entre 2,67 mm/ano e 5,45 mm/ano. Por fim, o autor concluiu que os aumentos observados para a precipitação não tiveram influência sobre a produção de eletricidade.

Silva *et al.* (2018) utilizaram análise de regressão linear e o teste de Kendall-tau para avaliar a tendência nos padrões de precipitação no município de Araripina-PE (sertão pernambucano) ao longo de 4 décadas de período amostral (1970 a 2012). Os resultados desta análise mostraram uma variação nos padrões da precipitação, em que os meses historicamente de maior precipitação até a década de 1970 (entre dezembro e abril) passaram a apresentar diminuição da precipitação, enquanto que os meses de menor precipitação (junho, julho e agosto), tiveram um acréscimo na ocorrência e no volume precipitado, o que coincidiu com o final da atuação negativa da Oscilação Decadal do Pacífico (ODP) e início da ODP positiva.

Com isso, as chuvas têm se apresentado mais distribuídas ao longo do ano, o que é indicação de uma tendência de umidificação na região.

Junqueira *et al.* (2020) analisou as tendências na precipitação pluvial no município de Juazeiro-BA a partir de uma série histórica de dados diários de 1980 a 2012. A verificação de tendências foi feita a partir do método de Mann-Kendall. A partir dos resultados verificou-se primeiramente que o ICP (índice de concentração da precipitação) anual médio de Juazeiro foi de 28,48 % o que indica um alto nível de concentração das chuvas (a precipitação total se concentra em 1/3 do ano). Por fim, a aplicação do teste de Mann-Kendall mostrou uma diminuição da média pluviométrica anual na ordem de 7,51 mm, o que o autor avalia como um risco de aumento do déficit hídrico na região.

Cabral Júnior e Lucena (2020) utilizaram os testes de Mann-Kendall (tendência) e Kruskal-Wallis (comparações múltiplas), para avaliar as tendências na precipitação pluvial no município de Caicó localizado na mesorregião Central Potiguar do estado do Rio Grande do Norte a partir de dados seculares de precipitação (1911 a 2017). Os resultados obtidos mostram que não existem tendências significativas na precipitação pluvial em Caicó no período de 1911 a 2017, no entanto, foram verificadas tendências significativas a 1% de aumento das chuvas no período de 1930 a 1980 e de diminuição de 1960-2000. Sobre estas tendências em períodos menores, os autores concluem que não se tratam necessariamente de mudanças no clima e podem estar associadas a uma variabilidade natural do clima.

Souza e Nascimento (2021) avaliaram as tendências anuais e sazonais da precipitação pluviométrica na região hidrográfica do Paraguaçu – BA entre 1989 e 2018. Os resultados obtidos a partir do método de Mann-Kendall indicam tendências negativas na precipitação em escala anual, com magnitudes de redução de até 20 mm por ano, com tendência significativa em três pontos no extremo oeste do alto Paraguaçu. Já na escala sazonal, as estações verão e primavera, que são chuvosas na maior porção da bacia, também apresentaram tendências negativas. Por outro lado, o outono e o inverno, que são as estações mais secas apresentaram tendências crescentes de precipitação (com incrementos anuais que chegam a quase 6 mm). A partir destes resultados, os autores concluem que possíveis mudanças na disponibilidade hídrica regional poderão vir a ocorrer relacionadas as tendências de aumento das chuvas nas estações mais secas (outono e inverno).

Ferreira *et al.* (2022) analisou as tendências climáticas anualmente (precipitação pluvial e temperatura do ar) em todo o estado do Ceará entre os anos 1981 e 2015. Tal estudo também teve como objetivo avaliar possíveis impactos no setor agrícola em virtude das tendências climáticas no estado. Os resultados obtidos demonstram uma diminuição da precipitação na ordem de 13 mm/ano em um núcleo ao noroeste do estado. Por outro lado, ao sul do estado, houve uma tendência de aumento de 3 a 5 mm/dia/ano. Por sua vez a temperatura mínima do ar apresentou tendência significativa de aumento ao sul, ao norte, na porção central, ao leste e ao oeste do estado. Ao nordeste e ao sudoeste do estado foi observada uma pequena área com tendência significativa de diminuição da temperatura mínima do ar. Por fim, a análise dos possíveis impactos na produtividade constatou uma redução na área plantada e na produção de feijão e milho, que no entanto não foi grande o suficiente a ponto de prejudicar a produtividade destas culturas no estado.

Alves *et al.* (2022) analisou as tendências na Precipitação pluvial na Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira, localizada na porção sul do estado da Bahia, a partir de dados mensais de precipitações obtidos em seis estações pluviométricas para o período de 1970 a 2020. Os resultados mostram que os testes de Mann-Kendall e Spearman's Rho foram aplicados de maneira satisfatória e não encontraram tendências estatisticamente significativas na precipitação pluvial na área, muito embora tenha sido observado que duas estações pluviométricas na porção centro oeste da bacia apresentaram expressiva tendência de redução da precipitação (em torno de 300 mm) sem significância estatística.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Caracterização da área de estudo

3.1.1. Localização do Baixo São Francisco

A Região Fisiográfica do Baixo São Francisco localiza-se na região Nordeste do Brasil, entre as coordenadas 8° e 11° de latitude sul e 36° e 39° de longitude oeste (Figura 1).

Figura 1 - Localização da Região Fisiográfica do Baixo São Francisco.



Elaboração: Organizado pelo autor, 2023.

3.1.2. Aspectos socioeconômicos

A região fisiográfica do Baixo São Francisco consiste num total de 78 municípios, que abrigam uma população de aproximadamente 1,4 milhões de habitantes, dos quais 440.000 residem em áreas ao longo do rio São Francisco. Dessa população total, cerca de 51% reside em áreas rurais e o restante está situado em zonas urbanas (JUNQUEIRA, 2002; CBHSF, 2016). A economia apresenta predomínio da agricultura de sequeiro e agricultura irrigada (cana, feijão, milho, mandioca, algodão, sisal, banana, abacaxi, fumo, hortaliças e café). O rio São Francisco também cumpre importante papel socioeconômico em toda a região fisiográfica. Seus principais usos são o abastecimento de água para populações urbanas, diluição de efluentes domésticos, abastecimento de agricultura irrigada, plantio de culturas de ciclo curto, pesca, aqüicultura, ecoturismo, navegação e exploração da hidroeletricidade através da Usina de Xingó. Quanto ao índice de desenvolvimento humano (IDH) nesta região, os valores registrados em 2010

apresentam uma média de até 0,57, a qual está bastante abaixo da média observada no alto SF, que é de 0,75 (CBHSF, 2016).

3.1.3. Aspectos físico-ambientais

A área de estudo está inserida sob o ponto de vista litológico na província estrutural da Borborema, que é formada por rochas metamórficas oriundas das colisões das placas tectônicas ocorridas durante o ciclo Brasileiro. Toda a sedimentação dessa área foi dada nos períodos jurássico e cretáceo (MMA, 2016).

Em relação a geomorfologia, a RBS é formada por quatro unidades: Depressões (aproximadamente 59% da área); Planaltos (aproximadamente 50% da área); Tabuleiros (aproximadamente 27% da área); Planícies (aproximadamente 4%) (MMA, 2016).

De acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger, os tipos climáticos predominantes na RBS são o semiárido quente (BSh) e o tropical semiúmido (As). O Semiárido quente predomina de Piranhas – AL a Traipu - AL, onde temperatura média anual é de 26 °C e a precipitação média anual de aproximadamente 600 mm, com período chuvoso de março a agosto. Já o tropical semiúmido predomina de Propriá, SE, à foz do Rio São Francisco, com temperatura média anual de 26 °C, precipitação média anual de aproximadamente 1200 mm e período chuvoso de março a agosto (SANTOS *et al.*, 2023).

No que diz respeito a hidrografia da RBS, uma das principais características é a predominância de rios intermitentes ou temporários, fato que está relacionado às condições litológicas e climáticas presentes no leito destes rios, estando estes encaixados em rochas sedimentares que atuam como acumuladores de água nos seus perfis e porque parte inferior do curso d'água não está sob influência do clima semiárido, fazendo com que eles sejam perenes. Do total de bacias que desaguam no rio São Francisco, apenas sete rios dispõem de água durante praticamente todos os meses do ano, são eles os rios: Boacica, Perucaba, Piauí, Itiúba, Jacaré, Betume e Pilões (NASCIMENTO *et al.*, 2013).

Quanto aos tipos de solos da RBS, o MMA (2016) destaca a existência de vinte e dois tipos, dos quais predominam as classes Neossolo litólico eutrófico (26,31% da área), Planossolo háplico eutrófico (26,09%), Neossolo regolítico eutrófico (15,84%), Argissolo vermelhoamarelo distrófico (7,57%), Luvissolo crômico órtico (5,70%),

Argissolo vermelho-amarelo eutrófico (4,46%), Latossolo amarelo distrófico (3,18%), Neossolo regolítico distrófico (1,87%).

Por fim, a fitofisionomia da área de estudo é dividida entre a Caatinga (19.982,50 Km²) e a Mata Atlântica (4.672,56 Km²) com seus ecossistemas associados (restingas, manguezais, campos de altitude), encaves florestais e brejos interioranos. A região apresenta uma zona de transição ecológica denominada por Agreste, paralela à região costeira, com maior umidade e índice pluviométrico do que a Caatinga na região do sertão (MMA, 2016).

3.2. Procedimentos Metodológicos

3.2.1. Aquisição de dados

Inicialmente, para analisar as variabilidades e as tendências das chuvas da RBS foram obtidos dados de precipitação pluvial referentes ao período de 1980 a 2013 a partir da base de dados climatológicos disponibilizada por Xavier *et al.* (2016). Esta base de dados consiste em uma grade georreferenciada de 0,25° x 0,25°, com valores diários e mensais de precipitação, obtidos a partir dos melhores resultados de interpolações realizadas por métodos como média aritmética, vizinho natural, IDW (inverso da distância ao quadrado) e krigagem ordinária. Para representar adequadamente toda a área de estudo a partir destes dados foi necessário obter séries históricas em um total de 39 pontos.

Para caracterizar as variabilidades fluviais, foram obtidos dados de vazão referentes ao período de 1982 a 2020 através da Agência Nacional de Águas (ANA), correspondentes a três municípios situados as margens do BCSF, que são: Piranhas/AL, Pão de Açúcar/AL e Propriá/SE. Além destes também foram obtidos junto a CHESF, dados referentes as vazões afluentes, defluentes e ao nível do reservatório de Sobradinho no período de 2013 a 2018.

3.2.2. Análise estatística

Em uma etapa seguinte, os dados obtidos foram organizados em planilhas do Microsoft Excel. Tanto os dados de precipitação quanto os de vazão são formados por séries mensais, sendo assim, foi necessário calcular os seus totais anuais, o que foi feito a partir de função específica no próprio Excel.

Em seguida, foram calculadas as estatísticas descritivas (média, desvio padrão e coeficiente de variação) para os dados de precipitação em conjunto e também para cada um dos 39 pontos de análise. Os dados fluviais foram analisados estatisticamente da mesma forma que os de precipitação. Por fim, os resultados foram organizados em forma de tabela.

A média é uma medida de tendência central, que segundo Piana (2013) têm o objetivo de representar o ponto de equilíbrio ou o centro de uma distribuição. Para o caso específico desta análise, foi utilizada a média aritmética, a qual pode é obtida através da equação 1:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^N Xi}{n} \quad (1)$$

em que \bar{X} representa a soma dos valores observados da variável X e n representa o número de valores do conjunto de dados.

O desvio padrão é definido como a raiz quadrada da variância. É utilizado para medir a variação dos dados, ou, o grau de afastamento das observações em relação à média. O desvio padrão é obtido através da equação 2:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Xi - \bar{X})^2}{N - 1}} \quad (2)$$

em que S é o desvio padrão de um determinado conjunto de dados, que depende da quantidade destes dados (N) e da sua média (\bar{X}).

O coeficiente de variação é a medida mais utilizada quando existe interesse em comparar variabilidades de diferentes conjuntos de dados (Piana, 2013). O coeficiente de variação é obtido através da equação 3:

$$CV = \frac{S}{\bar{X}} \quad (3)$$

onde, CV é o coeficiente de variação de um determinado conjunto de dados, obtido pela divisão de S (desvio padrão) e \bar{X} (média).

3.2.3. Representação da variabilidade espacial e temporal

Para representar a variabilidade das chuvas foram elaborados mapas de isoietas referentes as médias mensais, sazonais e anuais. Também foram elaborados mapas para representação da precipitação em anos padrão (seco, habitual e chuvoso). A elaboração dos mapas se deu a partir da extensão “*Geoestatistical Analyst*”, que faz parte do SIG Arcgis 10.1. O método de interpolação utilizado para gerar as isoietas de precipitação foi a krigagem ordinária. Segundo Flores (2000), “a krigagem é um processo de estimação de valores de observações distribuídas espacialmente, a partir de valores adjacentes”. De acordo com Yamamoto (2020) o estimador da krigagem ordinária é baseado na equação da média ponderada, podendo ser obtido através da equação 4:

$$Z * (X_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(X_i) \quad (4)$$

em que λ_i , $i=1,n$ são os pesos da krigagem ordinária associados aos n pontos de dados e x_0 é o valor da variável de interesse em um ponto não amostrado.

O número de classes de precipitação pluvial foi calculado através da fórmula de Sturges (1926, apud GERARDI, 1981, p.34) utilizando se para isso o Microsoft Excel. A equação de Sturges (5) é expressa por:

$$K = 1 + 3,322 * \log_{10}(N) \quad (5)$$

em que K é o numero de classes, N é o total de observações na amostra e \log é o logaritmo comum da base 10.

Após a definição do número de classes é necessário determinar sua amplitude. A amplitude é a diferença do limite superior e inferior da classe, dividida pelo número de classes, e pode ser obtida pela equação 6:

$$\Delta = \frac{X_{m\acute{a}x} - X_{m\acute{i}n}}{K} \quad (6)$$

A partir dos mapas gerados foi realizada uma análise climatológica visando caracterizar a variabilidade espacial e temporal da precipitação pluvial. Tal análise inicia-se com a apresentação dos mapas que representam a variabilidade média mensal da precipitação pluvial. Foi elaborado um total de doze mapas, cada um representando um respectivo mês do ano. Esta análise busca caracterizar quais os meses mais e os menos chuvosos, bem como, a distribuição espacial da precipitação pluvial em cada um.

Na sequência foram gerados os mapas que representam as médias sazonais de precipitação na área de estudo. Para esta análise foram elaborados quatro mapas, cada um representando uma respectiva estação do ano. Nesta etapa são discutidas as particularidades da distribuição espacial da precipitação em cada estação. Para a análise da precipitação anual foram elaborados quatro mapas: um para representação das isoietas médias anuais e os outros três para representação dos anos padrão (seco, habitual e chuvoso).

Para apoiar esta análise, inicialmente é apresentada uma tabela contendo os resultados dos parâmetros estatísticos calculados para cada um dos 39 pontos. Logo em seguida é apresentado o mapa contendo as isoietas médias anuais de precipitação, o qual discute a localização de pontos de baixa, média e alta precipitação destacados na tabela. Com o intuito de se analisar a variabilidade interanual da precipitação foi elaborado no Microsoft Excel um gráfico de barras para representar simultaneamente os totais de precipitação referentes a cada ano. A partir deste gráfico foi possível comparar os totais anuais e escolher no conjunto três anos, cada um destes representando um padrão de precipitação (seco, habitual e chuvoso).

3.2.4. Análise das tendências na precipitação

Em uma etapa seguinte foi verificado se há tendências significativas nas séries temporais das chuvas na RBS a partir da aplicação do teste não paramétrico de Mann-Kendall. O nível de significância estatística adotado foi de 10%, 5% e 1%. O teste de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975) é sugerido pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) para avaliação da tendência em séries temporais de dados ambientais.

A estatística do teste é dada pelas equações 7, 8, 9 e 10:

$$S = \sum_{i=n}^{n-1} \sum_{i+1}^n \text{sng}(x_j - x_i) \quad (7)$$

em que S é o resultado da soma das contagens de $(x_j - x_i)$; x_j é o primeiro valor após x_i , n é o número de dados da série temporal. Para cada par de dados são atribuídos os seguintes valores:

$$\text{sng}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1, & \text{se } x_j - x_i > 0 \\ 0, & \text{se } x_j - x_i = 0 \\ -1, & \text{se } x_j - x_i < 0 \end{cases} \quad (8)$$

A distribuição de probabilidade da estatística S tende à normalidade quando há grandes amostras de observações (n), com média zero e variância dada por:

$$\text{Var}(S) = \frac{\{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^m [t_i(t_i-1)(2t_i+5)]\}}{18} \quad (9)$$

em que (t_p) e número de dados com valores iguais num certo grupo (p_{th}) e q é o número de grupos contendo valores iguais na série de dados num certo grupo p.

O teste estatístico parametrizado (ZMK) é computado pela seguinte equação:

$$Z_s = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & \text{se } S > 0 \\ 0, & \text{se } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & \text{se } S < 0 \end{cases} \quad (10)$$

A hipótese nula de ausência de tendência (H_0), é rejeitada sempre que $|Z| > Z_{\alpha/2}$, em que α é o nível de significância adotado e $Z_{\alpha/2}$ é o valor crítico de Z a partir da tabela padrão normal. Para o nível de significância de 5% o valor de $Z_{\alpha/2}$ é 1.96. Os valores positivos de Z indicam tendências crescentes, enquanto que os valores negativos indicam tendências decrescentes.

3.2.5. Análise da variabilidade das vazões no baixo curso do rio São Francisco

Para analisar a variabilidade das vazões inicialmente foram calculadas as estatísticas mensais (médias, desvio padrão e coeficiente de variação) para os municípios de Piranhas/AL, Pão de Açúcar/AL e Propriá/SE a partir das funções disponíveis no software Microsoft Excel, o qual também foi utilizado para a elaboração de uma tabela na qual foram apresentados os resultados. Em seguida foi aplicado o teste de Mann Kendall para avaliar as tendências significativas nas vazões médias mensais de cada um dos municípios em análise. Na sequência foram comparadas as variabilidades mensais das chuvas e vazões a partir da interpretação de um gráfico misto de barras e linhas, elaborado no Excel.

Para a análise da variabilidade da vazão média anual foram calculadas as estatísticas descritivas para o conjunto de dados seguindo-se os mesmos procedimentos anteriores. Também foram calculadas as tendências (significativas a 5%, a 1% e a 0,1%) das vazões médias anuais a partir do teste de Mann Kendall. Em seguida foi elaborada uma tabela para apresentar os resultados estatísticos bem como os resultados referentes a análise das tendências.

Visando comparar o comportamento da vazão média anual entre os municípios da área de estudo foi elaborado um diagrama de caixas (*boxplot*) a partir do software *R-Studio*

Por fim, para a análise da variabilidade interanual das vazões foi elaborado um gráfico de linhas representando a variação entre os anos 1982 e 2020 para cada município; um gráfico misto de barras e linhas para representar as variações interanuais das chuvas e vazões no referido período; e um gráfico de linhas para representar as vazões afluentes, defluentes e o nível do reservatório de Sobradinho para o período de 2013 a 2018. Os referidos gráficos também foram elaborados no software Microsoft Excel.

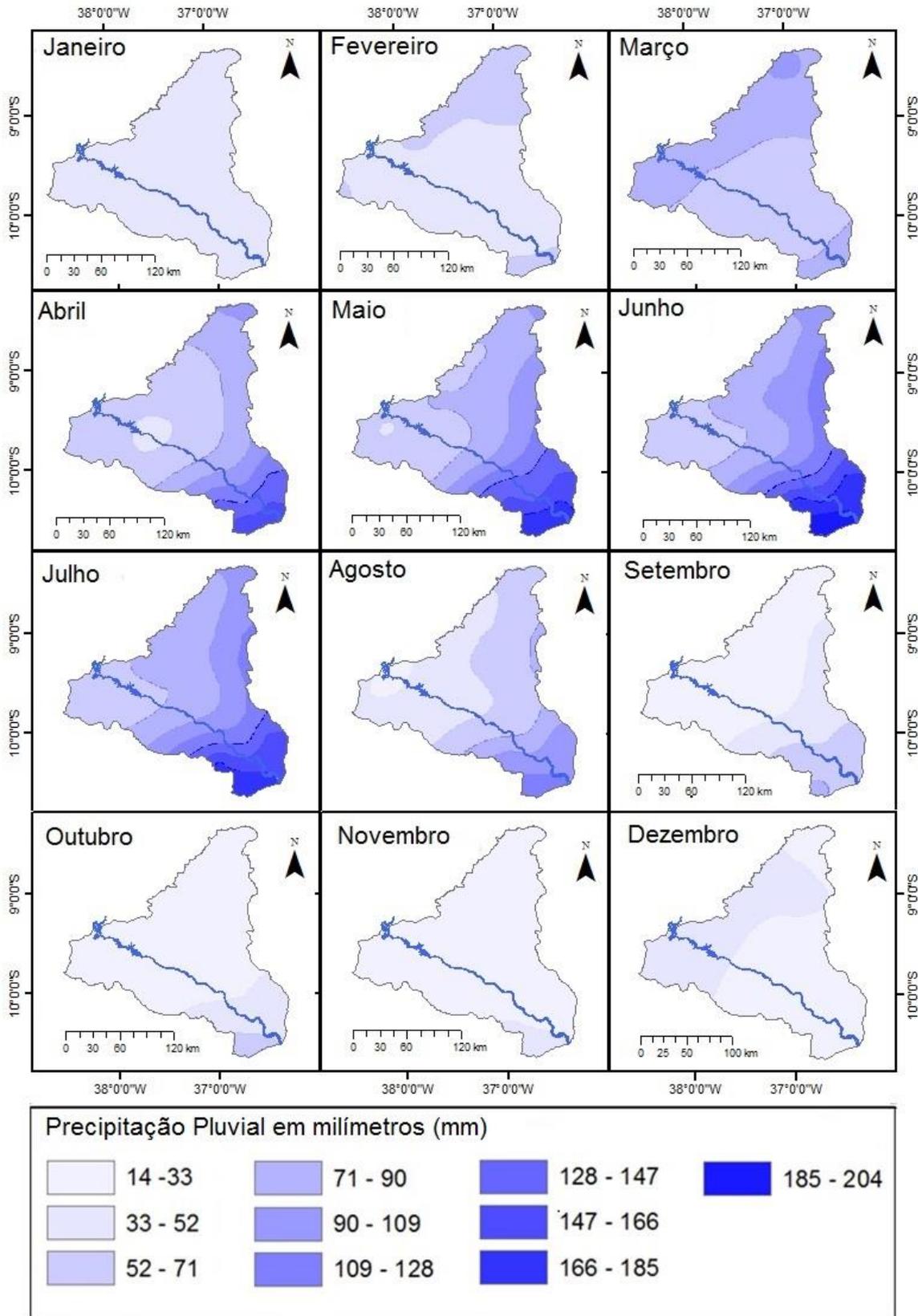
4. RESULTADOS

4.1. Análise das variabilidades da precipitação pluvial na Região Fisiográfica do Baixo São Francisco

4.1.1. Variabilidades médias mensais da precipitação pluvial

Inicialmente, foram elaborados um conjunto de 12 mapas de isoietas para representação da variabilidade média mensal da precipitação na RBS. A seguir, a Figura 2 apresenta os referidos mapas de precipitação média mensal.

Figura 2 - Variabilidade média mensal da precipitação pluvial na região do Baixo São Francisco.



Elaboração: Organizado pelo autor, 2023.

Observa-se que o período mais chuvoso na RBS se concentra entre abril e julho, enquanto o menos chuvoso ocorre entre setembro e dezembro. Os meses fevereiro e março apresentam valores de precipitação mais elevados em relação aos meses mais secos em trechos da porção oeste, norte e leste. O aumento gradual da precipitação nestes meses demarca a transição do período menos chuvoso para o mais chuvoso.

O mês de agosto apresenta uma redução da precipitação em relação aos meses anteriores que são mais chuvosos, demarcando a transição do período chuvoso para o seco. A distribuição espacial da precipitação nos meses mais chuvosos apresenta um padrão de maior variabilidade espacial e valores mais elevados de precipitação na porção sudeste e menor variabilidade e concentração dos menores valores de precipitação na porção oeste.

4.1.2. Variabilidades sazonais da precipitação pluvial na região do Baixo São Francisco

A seguir, a Figura 3 apresenta os mapas de isoietas referentes a análise da precipitação sazonal.

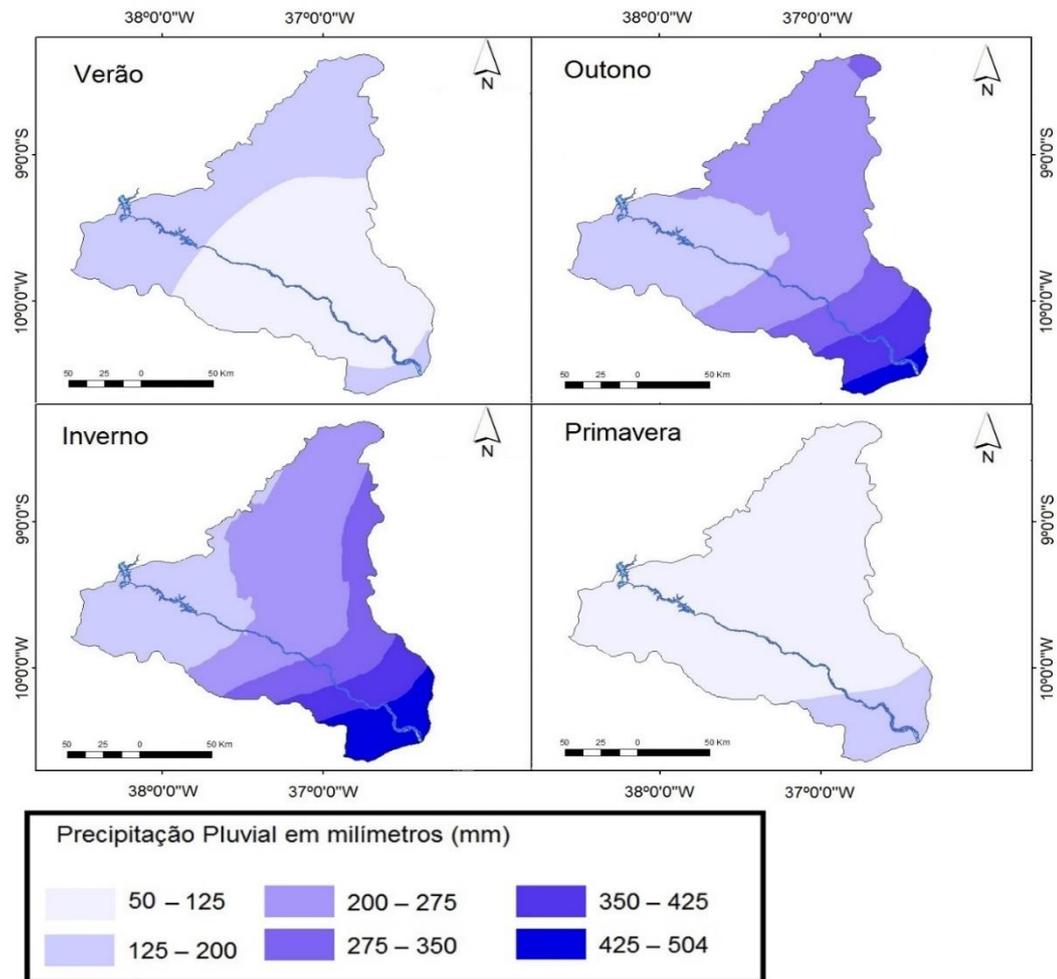
Conforme é mostrado na Figura 3, as estações primavera e verão abarcam o período menos chuvoso do ano, no qual a precipitação varia de 50 mm a 200 mm. Já as estações outono e inverno abarcam o período mais chuvoso, que apresenta variação de 125 mm a 504 mm de precipitação.

Na primavera, observa-se que a faixa de precipitação que vai de 50 mm a 125 mm se estende por praticamente toda a região fisiográfica, com exceção de uma pequena faixa na porção leste, que apresenta precipitação na faixa de 125 mm a 200 mm.

No verão, toda a porção oeste, norte e uma pequena faixa na porção sudeste encontram-se dentro da faixa de precipitação que vai de 125 mm a 200 mm, enquanto a porção central e parte da porção sudeste apresentam precipitação de 50 mm a 125 mm.

Essas estações também apresentam uma faixa de precipitação que abarca toda a porção norte e central da RBS, onde a precipitação varia de 200 mm a 275 mm.

Figura 3 - Variabilidade sazonal da precipitação pluvial na região do baixo São Francisco.



Elaboração: Organizado pelo autor, 2023.

Nas estações outono e inverno, a precipitação apresenta um padrão de distribuição espacial semelhante ao observado anteriormente nos meses mais chuvosos (maior quantidade na porção sudeste menor variabilidade e quantidade na porção oeste). Ao longo destas estações, a precipitação varia de 275 mm a 504 mm na porção leste, enquanto na porção oeste, a variação é de 125 mm a 200 mm.

4.1.3. Análise estatística dos totais anuais de precipitação pluvial na região do Baixo São Francisco

Verificam-se na Tabela 1 os pontos que apresentam quantitativo de precipitação inferior a 600 mm/ano, sendo os seguintes pontos (destacados com a cor laranja): 8, 14, 15, 16, 17, 18, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 29. Destaca-se que a média geral da precipitação, para toda a área é de 692,8 mm/ano. Nestes pontos, os

valores de desvio padrão variaram de 151,6 mm a 175,6 mm e o coeficiente de variação variou de 28,7% a 31,9%. Os pontos 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 19, 20, 27, 28, 30, 31 e 32 (destacados com a cor cinza) apresentaram médias de precipitação entre 600 mm e 800 mm, que são valores mais próximos a média geral. Nestes pontos, os valores de desvio padrão variaram de 173,7 mm a 220,3 mm e o coeficiente de variação variou de 24,6% a 32,6%.

Ao analisar as tendências anuais, constatou-se que tendências significativas a 5% ou 10% com sinais positivos foram observadas em 28% dos pontos analisados, ou seja, houve aumento na quantidade de precipitação, com acréscimo que variou de 5,4 a 11,2 mm por ano.

Tabela 1 - Estatísticas da precipitação acumulada anual da região do Baixo São Francisco, no período de 1980 a 2013.

Pontos	Média	Desvio padrão (mm)	Coeficiente de variação (%)	Estatística Z (Mann-Kendall)	Magnitude (mm)
0	673,07	209,52	31,13	0,30	-
1	621,19	186,49	30,02	0,24	-
2	663,94	193,83	29,19	0,33	-
3	732,9	201,45	27,49	0,68	-
4	610,95	192,69	31,54	1,04	-
5	638,74	188,21	29,47	0,59	-
6	659,7	196,52	29,79	0,62	-
7	758,89	202,51	26,68	0,98	-
8	526,41	168,15	31,94	0,18	-
9	649,86	209,68	32,27	1,88	* 7,5
10	619,83	181,75	29,32	1,81	* 6,3
11	638,49	208,25	32,62	1,84	* 8,2
12	666,24	216,4	32,48	1,75	* 8,0
13	768,38	220,37	28,68	2,1	** 8,3
14	522,35	166,61	31,9	0,47	-
15	531,36	169,95	31,98	0,15	-
16	524,69	157,32	29,98	1,01	-
17	538,7	159,2	29,55	1,10	-
18	582,48	173,18	29,73	1,39	-
19	634,75	178,33	28,09	2,06	** 7,5
20	737,48	202,54	27,46	2,16	** 8,5
21	541,31	158,38	29,26	0,03	-
22	543,86	161,01	29,61	0,24	-
23	532,5	162,06	30,43	0,30	-
24	527,03	151,67	28,78	0,60	-
25	549,69	163,29	29,71	1,20	-
26	582,88	175,65	30,13	1,28	-

27	639,94	173,72	27,15	1,59	-
28	731,35	184,16	25,18	1,72	* 5,4
29	585,08	168,86	28,86	0,31	-
30	661,69	186,63	28,2	0,15	-
31	737,51	195,65	26,53	0,06	-
32	787,02	194,25	24,68	1,07	-
33	819,4	207,41	25,31	1,87	* 5,4
34	1024,04	241,08	23,54	1,45	-
35	1089,24	273,77	25,13	0,21	-
36	1015,24	237,54	23,4	1,72	* 7,2
37	1110,66	278,36	25,06	1,60	-
38	1241,48	280,98	22,63	2,08	** 11,2

Elaboração: Organizado pelo autor, 2023. *significativo a 10%. **significativo a 5%. ***significativo a 1%.

Os pontos (destacados com a cor azul) 33, 34, 35, 36, 37 e 38 apresentaram médias acima de 800 mm. Os valores de desvio padrão variaram de 207,4 a 280,9 e o coeficiente de variação variou de 22,6% a 25,3%.

Por fim, ao analisar as tendências sazonais da precipitação constatou-se que predominantemente as tendências significativas a 5% foram observadas em 18% dos pontos analisados, com sinais positivos indicando um aumento na quantidade de precipitação, com acréscimo que variou de 3,22 a 5,26 mm por ano. A seguir a Tabela 2 apresenta as tendências sazonais para a precipitação pluvial na RBS.

Tabela 2 - Tendências sazonais para a precipitação pluvial na região do Baixo São Francisco.

Ponto	VERÃO		OUTONO		INVERNO		PRIMAVERA	
	Valor Z	Magnitude (mm)	Valor Z	Magnitude (mm)	Valor Z	Magnitude (mm)	Valor Z	Magnitude (mm)
0	0.79	-	-0.56	-	0.35	-	0.44	-
1	0.26	-	-0.71	-	0.41	-	0.14	-
2	0	-	-0.85	-	0.47	-	0.05	-
3	0.29	-	-0.56	-	1.45	-	1.05	-
4	0.04	-	-0.11	-	2.04	** 3,22	0.90	-
5	0	-	-0.26	-	1.57	-	0.66	-
6	-0.54	-	-0.91	-	0.68	-	0.17	-
7	-0.23	-	-0.20	-	1.86	-	1.26	-
8	-0.03	-	0.01	-	0.97	-	0.57	-
9	0.18	-	0.59	-	2.47	** 4,01	1.31	-
10	0.68	-	0.41	-	2.34	** 3,75	1.30	-
11	0.51	-	0.91	-	2.40	** 4,65	1.09	-
12	0.34	-	0.91	-	2.25	** 5,26	1.18	-
13	0.44	-	0.65	-	2.60	** 5	1.54	-

14	0.26	-	-0.47	-	0.04	-	0.23	-
15	0.51	-	-0.32	-	0.35	-	0.26	-
16	0.79	-	0.07	-	1.18	-	1.06	-
17	1.34	-	-0.20	-	1.40	-	0.77	-
18	0.80	-	0	-	1.71	-	1.00	-
19	0.20	-	0.65	-	1.86	-	1.00	-
20	0.51	-	0.83	-	2.07	** 3,53	0.94	-
21	1.00	-	-0.68	-	0.11	-	0.32	-
22	0.75	-	-0.35	-	0.48	-	0.47	-
23	0.74	-	-0.57	-	0.62	-	0.35	-
24	0.94	-	-0.29	-	0.44	-	0.91	-
25	1.11	-	-0.38	-	1.15	-	0.51	-
26	0.82	-	-0.20	-	0.97	-	0.22	-
27	0.38	-	0.68	-	0.69	-	0.41	-
28	0.29	-	0.88	-	0.85	-	0.20	-
29	0.41	-	-0.78	-	0.91	-	0.14	-
30	0.69	-	-0.81	-	1.09	-	-0.02	-
31	0.61	-	-0.41	-	0.57	-	-0.41	-
32	-0.03	-	0.62	-	0.54	-	-0.11	-
33	0.18	-	1.00	-	1.17	-	0.11	-
34	0.40	-	1.27	-	1.39	-	0.05	-
35	-0.10	-	0.16	-	0.05	-	0	-
36	0.17	-	0.91	-	1.33	-	0.20	-
37	0.32	-	1.57	-	1.30	-	0.08	-
38	0.51	-	1.18	-	1.54	-	0.53	-

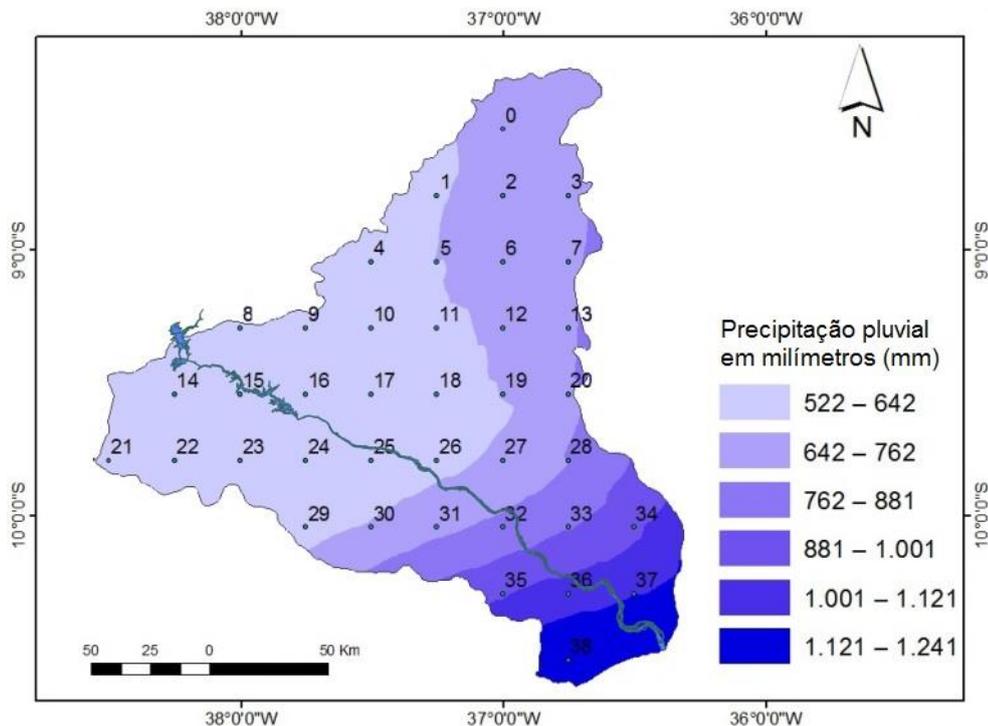
Elaboração: Organizado pelo autor, 2023. *significativo a 10%. **significativo a 5%. ***significativo a 1%.

Utilizando - se do método de Mann-Kendall, outros autores também evidenciaram tendências crescentes na precipitação pluvial em diferentes localidades na região nordeste. Na região hidrográfica do rio Paraguaçu – BA, Souza e Nascimento (2021) verificaram que entre 1989 e 2018 ocorreram incrementos de precipitação na ordem de 5 mm/ano. Na mesorregião do sertão paraibano Medeiros (2018) verificou incrementos de precipitação na ordem de 2,67 mm/ano e 5,45 mm/ano. Ao sul do estado do Ceará, Paulo Ferreira *et al.* (2022) verificou incrementos na ordem de 3 a 5 mm/ ano.

4.1.4. Variabilidade espacial das médias anuais na região do Baixo São Francisco

Foi elaborado um mapa para representação da distribuição espacial das médias anuais de precipitação (1980-2013). O referido mapa é apresentado a seguir, na Figura 4.

Figura 4 - Distribuição média anual da precipitação pluvial na região do Baixo São Francisco.



Elaboração: Organizado pelo autor, 2023.

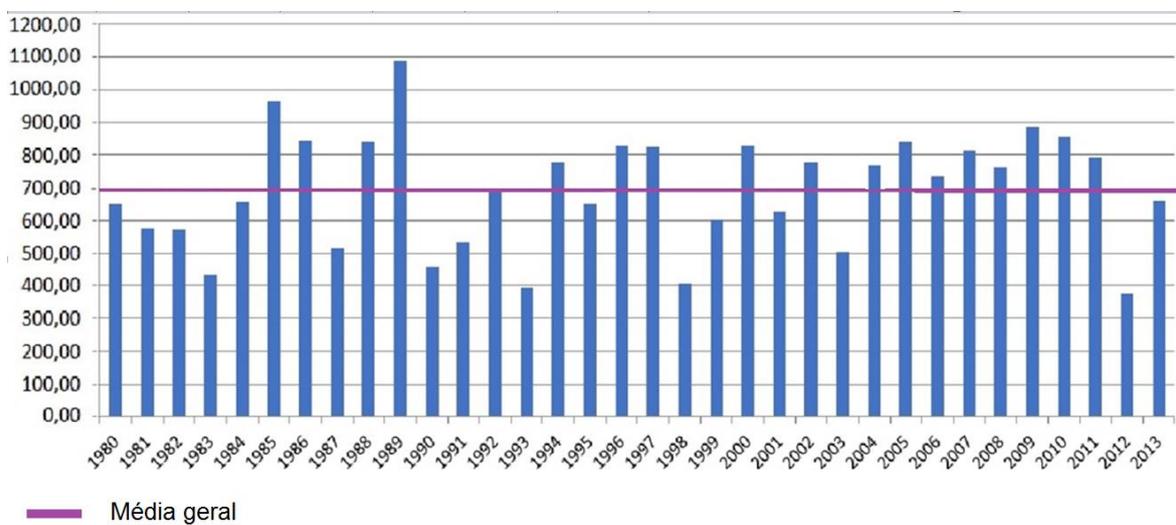
A análise da Figura 4 permite observar que as chuvas na RBS apresentam um padrão de distribuição espacial que já foi observado anteriormente na representação dos meses chuvosos (Abril, maio, junho e julho), ou seja, maior variabilidade e concentração dos valores mais elevados de precipitação nas porções sul e leste, menor variabilidade e concentração dos menores valores de precipitação na porção oeste. Como pode ser observado na figura 4, a porção leste divide-se em 4 diferentes faixas de precipitação que variam de 762 mm até 1.241 mm (sudeste). A porção oeste apresenta uma única faixa de precipitação variando de 522 a 642 mm. Nota-se que esta faixa é a que possui a maior extensão espacial entre todas as observadas. Ao longo desta faixa estão situados todos os pontos abaixo da média citados na tabela 1. A Figura 4 também permite observar uma segunda grande faixa de precipitação distribuindo-se em trechos da porção norte, central e sul da RBS. Esta faixa abrange os

pontos que apresentaram médias de precipitação entre 642 e 762 mm sendo assim, é a área onde se localizam os pontos com valores mais próximos da média geral de 692,8mm.

4.1.5. Variabilidade interanual da precipitação pluvial na região do Baixo São Francisco entre os anos 1980 e 2013

A seguir, a Figura 5 apresenta as variações interanuais da precipitação para toda a região.

Figura 5 - Variabilidade interanual da precipitação pluvial no Baixo São Francisco.



Elaboração: Organizado pelo autor, 2023.

Conforme observa se na Figura 5, a precipitação pluvial na RBS apresentou uma elevada irregularidade interanual entre os anos 1980 e 2013. Os anos 1983, 1993, 1998 e 2012 ficaram bastante abaixo da média geral, apresentando valores próximos a 400 mm. Por outro lado, os anos 1985, 1986, 1988 e 1989 destacaram se pela quantidade excepcional de chuvas acima da média, com valores acima de 800 mm. Ocorreram também muitos anos em que os valores de precipitação pluvial ficaram próximos a média geral, intercalando com os anos de pouca e elevada precipitação, entre os quais destaca se 1980, 1984, 1994, 1995 e 2006.

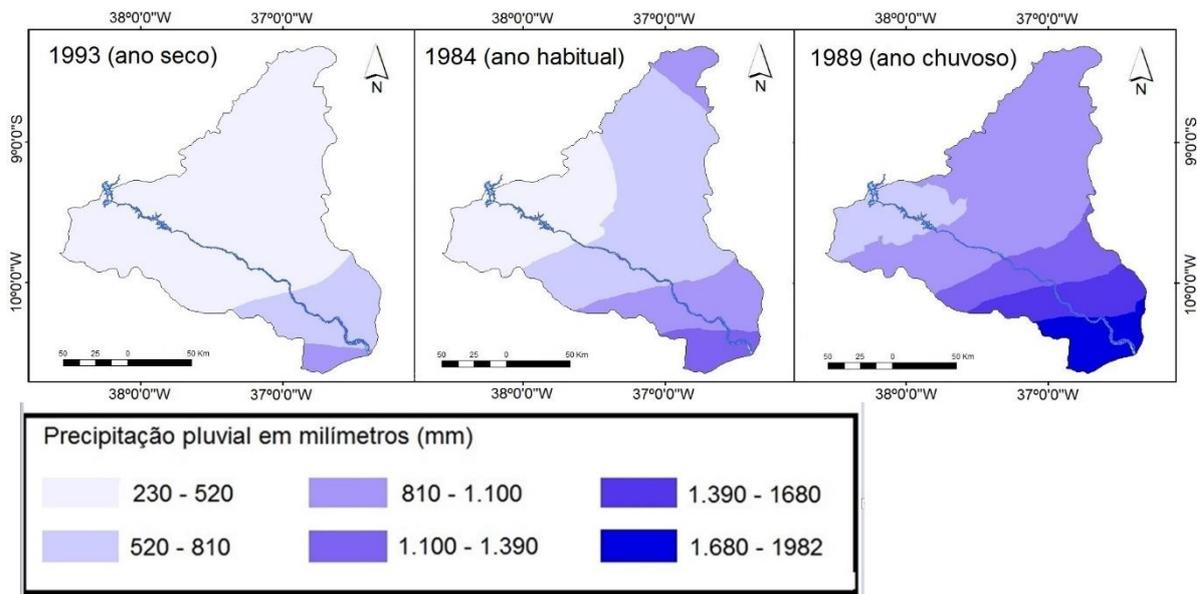
4.1.6. Análise da variabilidade em anos padrão (seco, habitual e chuvoso)

A análise realizada anteriormente permitiu que fossem selecionados 3 anos da série histórica, cada um representando um diferente padrão de precipitação

pluvial (seco habitual e chuvoso) para realização de uma análise mais aprofundada a respeito da variabilidade espacial das chuvas na RBS. Para representar a baixa precipitação, foi selecionado o ano de 1993; para precipitação habitual foi selecionado o ano de 1984 e para o padrão chuvoso, foi selecionado o ano de 1989.

A seguir, a Figura 6 apresenta o mapa de isoietas correspondente ao ano de 1993 (menor precipitação).

Figura 6 - Variabilidade espacial da precipitação pluvial em anos padrão (seco, habitual e chuvoso) no Baixo São Francisco.



Elaboração: Organizado pelo autor, 2023.

Conforme a Figura 6, no ano de 1993 (seco), a precipitação na RBS variou de 230 mm a 880 mm. No que diz respeito a distribuição espacial das chuvas neste ano, observa-se que as porções oeste, norte e central situam-se dentro da faixa de precipitação que vai de 230 mm a 520 mm. Por sua vez, a porção leste apresenta valores mais elevados de precipitação, que variam de 520 mm a 1.100 mm. No ano de 1984, a variação da precipitação foi de 230 mm a 1.390 mm. Este ano também apresentou um padrão espacial parecido com o que foi observado anteriormente (maior precipitação e variabilidade na porção leste e menor precipitação e variabilidade no oeste). O quantitativo de precipitação variou de 230 mm e 810 mm nas duas faixas de maior extensão que abarcam toda a porção oeste e central e parte da norte. Na porção leste a variação foi de 810 mm a 1.390 mm. É observada também uma pequena área no extremo norte dentro da faixa de precipitação que vai de 810 mm a 1.100 mm. Por fim, no

ano de 1989, a variação da precipitação foi de 520 mm a 1.982 mm. Neste ano, a porção leste também apresentou maior variabilidade espacial e valores de precipitação, que variou de 1.100 mm a 1.982 mm. Na porção oeste, a faixa de baixa precipitação ocupou uma porção de área bem menor que nos outros anos, com valores de 520 mm a 810 mm. As porções norte e central estão dentro de uma única faixa de precipitação, que vai de 1.100 a 1.390.

4.2. Análise das vazões no baixo curso do rio São Francisco

4.2.1. Variabilidade das vazões médias mensais

A seguir, a Tabela 3 apresenta as estatísticas mensais (média, desvio padrão e coeficiente de variação) referentes as vazões nos municípios de Piranhas/AL, Pão de Açúcar/AL e Propriá/SE.

Tabela 3 - Vazões médias mensais nos municípios de Piranhas/AL, Pão de Açúcar/AL e Propriá/SE entre 1982 e 2020.

	Piranhas/AL			Pão de Açúcar/AL			Propriá/SE		
	Média (m ³ /s)	Desvio padrão (m ³ /s)	Coeficiente de variação (%)	Média (m ³ /s)	Desvio padrão (m ³ /s)	Coeficiente de variação (%)	Média (m ³ /s)	Desvio padrão (m ³ /s)	Coeficiente de variação (%)
jan	2130,3	1400,6	65,7	2196,8	1265,1	57,6	2093,2	1212,5	57,9
fev	2487,1	2078,4	83,6	2510,6	1884,9	75,1	2391,1	1715,0	71,7
mar	2359,1	2082,9	88,3	2399,5	1877,7	78,3	2300,7	1685,1	73,2
abr	2071,2	1454,4	70,2	2146,1	1337,1	62,3	2080,9	1268,8	61,0
mai	1769,1	807,6	45,6	1857,5	741,9	39,9	1843,0	773,4	42,0
jun	1550,7	499,9	32,2	1647,4	497,1	30,2	1611,6	487,4	30,2
jul	1546,1	452,4	29,3	1639,0	468,6	28,6	1601,4	429,1	26,8
ago	1604,1	481,0	30,0	1686,0	485,1	28,8	1620,9	465,8	28,7
set	1688,2	509,5	30,2	1772,2	519,6	29,3	1690,5	493,2	29,2
out	1787,3	535,7	30,0	1879,9	551,3	29,3	1781,9	522,4	29,3
nov	1817,6	581,3	32,0	1915,3	576,2	30,1	1822,0	539,6	29,6
dez	1918,5	919,5	47,9	2015,3	841,4	41,8	1912,6	817,3	42,7

Elaboração: Organizado pelo autor, 2023.

Observa – se na Tabela 3 que as maiores vazões médias mensais ocorreram no período de janeiro a abril, com quantitativos superiores a 2.000 m³/s em todos os pontos analisados. No mês de fevereiro, o município de Pão de Açúcar/AL registrou a maior vazão média deste período, que foi de 2.510 m³/s. Os meses de janeiro a

abril também demarcam o período de maior variabilidade das vazões, com desvio padrão entre 1.212 m³/s e 2.082 m³/s e coeficiente de variação entre 57% e 88%.

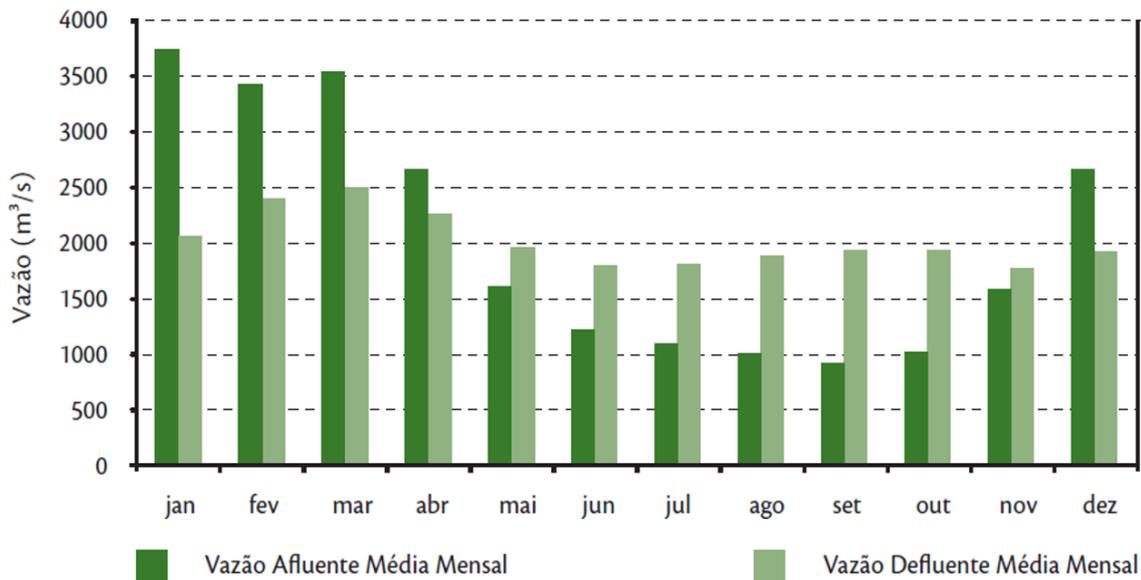
As menores vazões mensais ocorreram no período de junho a agosto, com quantitativos variando entre 1.546 m³/s e 1.686 m³/s. A menor vazão média deste período, que foi de 1.546 m³/s, ocorreu no mês de julho, no município de Piranhas/AL. Após este período de menores vazões anuais é observado um período de aumento progressivo destas entre os meses de agosto e dezembro em todos os pontos de análise, com variação entre 1.688 m³/s e 2.015 m³/s.

O período de menor variabilidade das vazões é observado entre maio e dezembro, com desvio padrão entre 429 m³/s e 919 m³/s e coeficiente de variação entre 26% e 47 %.

A variabilidade mensal observada nos municípios em análise é altamente influenciada pelas operações das UHEs existentes a montante da RBS, especialmente na barragem de Sobradinho. Sendo assim, para uma maior compreensão a respeito da dinâmica dessas vazões, é importante verificar a diferença entre as vazões que chegam nessa barragem (vazão afluente) e a vazões que são liberadas (vazão defluente). A seguir, a Figura 7 apresenta a vazão média mensal afluente e defluente no reservatório de Sobradinho entre 1988 e 2010, ou seja, no período em que o controle de vazões esteve em pleno funcionamento.

Observa-se na Figura 7 que o mês de janeiro é o que apresenta a maior diferença entre vazões afluentes e defluentes, a qual ultrapassa 1.500 m³/s. Nos meses de fevereiro e março, a diferença entre as vazões que chegam em Sobradinho e as que são liberadas pela barragem é de aproximadamente 1.000 m³/s. De maio a novembro, observa-se uma redução acentuada das vazões afluentes e uma mudança na operação da barragem, que passa a liberar vazões defluentes maiores que as afluentes. O mês setembro apresenta os maiores quantitativos de liberação das defluências em relação as afluências, a qual é de aproximadamente 1.000 m³/s.

Figura 7 - Vazão média mensal afluyente e defluyente no reservatório de Sobradinho entre 1988 e 2010.



Elaboração: ANA, 2012.

A partir do teste não paramétrico de Mann Kendall foram calculadas as tendências significativas (a 5%, 1% e 0,1%) das vazões médias mensais no BCSF, cujos resultados são apresentados a seguir, na Tabela 4:

Tabela 4 - Tendências das vazões médias mensais nos municípios de Piranhas/AL, Pão de Açúcar/AL e Propriá/SE entre 1982 e 2020.

	Piranhas/AL		Pão de açúcar/AL		Propriá/SE	
	Estatística Z (Mann-Kendall)	Magnitude (m³/s)	Estatística Z (Mann-Kendall)	Magnitude (m³/s)	Estatística Z (Mann-Kendall)	Magnitude (m³/s)
jan	-8.18	-62,53***	-7.57	-	-8.95	-57.32***
fev	-6.46	-	-6.41	-60.2*	-6.33	-58.51***
mar	-5.80	-58,29***	-5.83	-55.12**	-5.46	-55.03***
abr	-4.98	-40,66***	-4.98	-44.26***	-4.88	-
mai	-4.25	-36,46*	-4.13	-37.37***	-4.01	-33.38***
jun	-4.98	-34,18***	-4.79	-33.50*	-4.40	-
jul	-2.85	-20,49**	-2.51	-18.16**	-2.03	-10.79*
ago	-3.02	-23,40**	-2.80	-19.86**	-1.66	-
set	-2.54	-19,08 **	-2.05	-17.05*	-1.16	-
out	-2.22	-19,75*	-1.5	-	-0.72	-
nov	-2.85	-27,94**	-2.29	-24.22*	-1.79	-
dez	-2.85	-30,10 **	-2.37	-27.04**	-1.59	-

Elaboração: Organizado pelo autor, 2023. *significativo a 5%; **significativo a 1%; ***significativo a 0,1%.

Conforme é observado na Tabela 4, no município de Piranhas/AL, com exceção do mês de fevereiro, os demais apresentaram tendências significativas

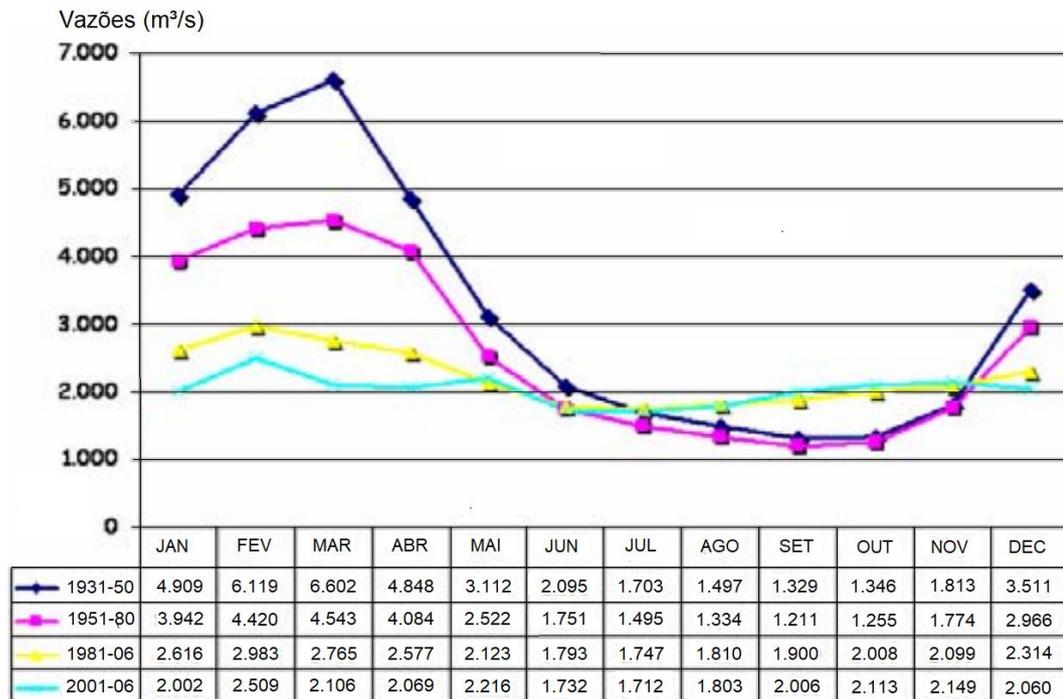
negativas, que indicam redução nas vazões. No município de Pão de Açúcar/AL, apenas os meses de janeiro e outubro não apresentaram tendências significativas, sendo que nos demais meses são observadas tendências significativas negativas. Em Propriá/SE, os meses de abril, junho, agosto, setembro, outubro, novembro e dezembro são os que não apresentaram tendências, enquanto nos demais meses também são observadas tendências de redução nas vazões.

O período de janeiro a abril, que como foi visto na Tabela 3 se caracteriza como o período de vazões mais elevadas no ano, apresentou a maior redução entre os municípios, com quantitativos variando entre $-40,66 \text{ m}^3/\text{s}$ e $-62,53 \text{ m}^3/\text{s}$. Tendências de redução menores foram observadas entre julho e novembro, com quantitativos de redução variando entre $-27,94 \text{ m}^3/\text{s}$ e $-10,79 \text{ m}^3/\text{s}$.

Tendências de redução nas vazões do BCSF também foram observadas por Vasco (2017) ao aplicar os modelos de probabilidade Log-pearson 3, Pearson 3, Normal, Log-normal 2 e Weibull em dados fluviométricos referentes aos municípios de Piranhas/AL e Pão de Açúcar. Em Piranhas, o autor observou reduções de 40%, 56%, 60% e 39% para os meses de janeiro, fevereiro, março e abril respectivamente. Em Pão de açúcar/AL, as reduções foram de 51%, 64%, 66% e 50% para os meses de janeiro, fevereiro, março e abril respectivamente.

Ribeiro *et al.* (2009) mostram que a redução das vazões no BCSF já vinha ocorrendo décadas antes da barragem de Sobradinho entrar em operação (Figura 8). Entre os anos 1931 e 1950, o pico de vazões de janeiro a abril em Traipu/AL ficava entre 5.000 e 6.500 m^3/s , ao passo que entre os anos 2000 e 2006, esse pico passou a ser de 2.000 a 2.500 m^3/s , ou seja, houve uma redução de 61% nos picos de vazões deste período. A seguir, a Figura 8 apresenta a evolução das vazões médias mensais no município de Traipu/AL, nos períodos de 1931 a 1950, 1951 a 1980, 1981 a 2006 e 2001 a 2006.

Figura 8 - Variabilidade das vazões médias mensais no município de Traipu/AL entre 1931 e 2006.



Elaboração: Ribeiro *et al.*, 2009.

A Figura 8 também mostra que houve um aumento das vazões menores referentes aos meses de agosto, setembro e outubro, que entre 1931 e 1980 ficavam próximas a 1000 m³/s e que a partir de 1981 passaram a ficar próximas dos 2000 m³/s nestes meses.

Estudos realizados nas últimas décadas (FONTES *et al.*, 2003; MARTINS *et al.*, 2011; ANA, 2012; NASCIMENTO *et al.*, 2013; MEDEIROS *et al.*, 2014) atribuem a redução das vazões no BCSF às operações de regularização realizadas nas UHEs instaladas ao longo do rio São Francisco, especialmente à barragem de Sobradinho. Para manter reservatório em níveis que garantam a geração de energia ininterrupta, a barragem de Sobradinho tem atuado no sentido de promover vazões mais uniformes ao longo do ano, sem variações tão bruscas de estiagens ou cheias, fato que pode ser observado a partir da evolução das vazões apresentada na Figura 8.

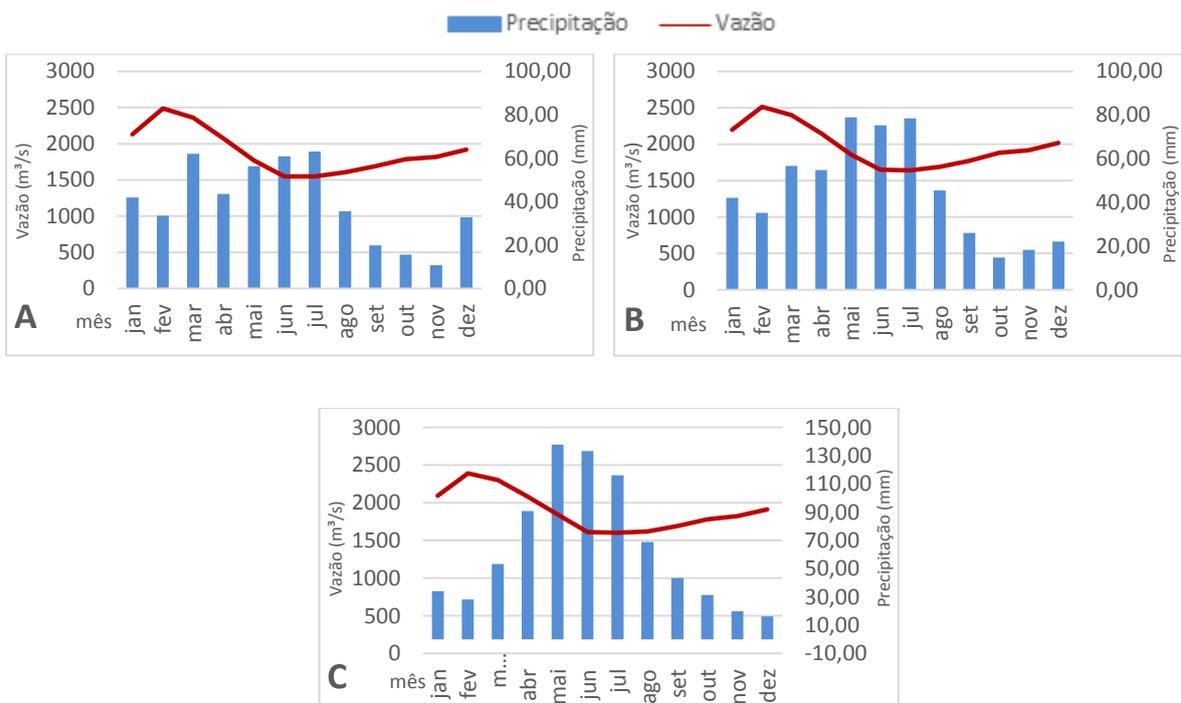
Martins *et al.* (2011) identificaram que nos anos após instalação da barragem de Sobradinho houve uma redução percentual média de 6 a 12% nas cotas maiores (C5) e uma elevação de 20 a 32% nas cotas menores (C95), além de uma redução de 9% na vazão máxima (Q5) e aumento de 27% na vazão mínima (Q95).

Vasco (2017) observa que em decorrência do funcionamento das UHEs, o regime de fluxo do rio São Francisco não é mais regido por seus pulsos naturais, mas pela dinâmica produtiva das usinas. Fioreze *et al.* (2012) aponta que a operação do reservatório de Sobradinho consiste basicamente em guardar água nos anos chuvosos ou em períodos chuvosos para enfrentamento de anos mais secos ou períodos mais secos.

4.2.2. Variabilidade média mensal das chuvas e vazões no baixo curso do rio São Francisco

As vazões médias mensais também foram analisadas juntamente a precipitação média mensal correspondente aos municípios em análise. A seguir, a Figura 9 apresenta a variabilidade média mensal das chuvas e vazões nos municípios de Piranhas/AL, Pão de Açúcar/AL e Propriá/SE no período de 1982 a 2020.

Figura 9 - Variabilidade média mensal das chuvas e vazões entre 1982 e 2020 para as localidades de Piranhas/AL (A), Pão de Açúcar/AL (B) e Propriá/SE (C).



Elaboração: Organizado pelo autor, 2023.

Conforme pode ser observado na Figura 9, existe uma dinâmica caracterizada pelo desencontro entre os períodos de maior e menor quantitativos de chuvas e vazões nos três municípios, de forma que, ao longo do período de maior pluviosidade na RBS (maio a julho), o rio São Francisco entra em seu período anual de menores vazões, enquanto ao longo dos meses de menor pluviosidade, as vazões do rio São Francisco aumentam progressivamente até atingirem seu pico em fevereiro.

A observação dessa dinâmica no BCSF permite inferir que a redução das vazões de janeiro a abril (conforme foi observado a partir do teste de Mann Kendall na Tabela 4) pode estar agravando as condições hídricas na RBS, uma vez que o aporte hídrico do rio está sendo reduzido justamente no período de baixa precipitação na região. De acordo com Fioreze *et al.* (2012) a redução das vazões faz com que as populações ribeirinhas a jusante do reservatório de Sobradinho tenham a sensação de que o rio está “morrendo”, comparado com sua pujança anterior à construção da barragem.

4.2.3. Variabilidade da vazão média anual no baixo curso do rio São Francisco

Foram calculadas as estatísticas descritivas para o conjunto de dados de vazões médias anuais referentes aos municípios de Piranhas/AL, Pão de Açúcar/AL e Propriá/SE (Tabela 5). Destaca-se que a média geral da vazão (correspondente aos três municípios) é de 1.920 m³/s; o desvio padrão é de 1.086 m³/s e o coeficiente de variação é de 56,6%.

Entre os municípios analisados, Pão de Açúcar/AL apresentou a maior vazão média anual, que foi de 1.972 m³/s. O município de Piranhas/AL apresentou os maiores valores de desvio padrão e coeficiente de variação, que foram de 1.077 m³/s e 54,6%, respectivamente.

Também foram analisadas as tendências (significativas a 5%, a 1% e a 0,1%) das vazões médias anuais a partir do teste de Mann Kendall, cujos resultados são apresentados a seguir, na Tabela 5:

Tabela 5 - Estatísticas da vazão média anual referentes aos municípios de Piranhas/AL, Pão de Açúcar/AL e Propriá/SE no período de 1980 a 2013.

Municípios	Média	Desvio padrão (mm)	Coeficiente de variação (%)	Valor de Z (Mann Kendall)	Magnitude (mm)
Piranhas	1894,12	1172,15	61,88	-3.65	-42.53***

Pão de Açúcar	1972,13	1077,77	54,65	-3.75	-41.97***
Propriá	1895,81	1003,80	52,95	-3.38	-35.84***

Elaboração: Organizado pelo autor, 2023. *significativo a 5%; **significativo a 1%; ***significativo a 0,1%.

Assim como foi observado anteriormente para as vazões médias mensais, as vazões médias anuais no BCSF também apresentam tendências significativas de redução em sua magnitude, com quantitativos de redução variando entre -35.84 m³/s e -42.53 m³/s por ano.

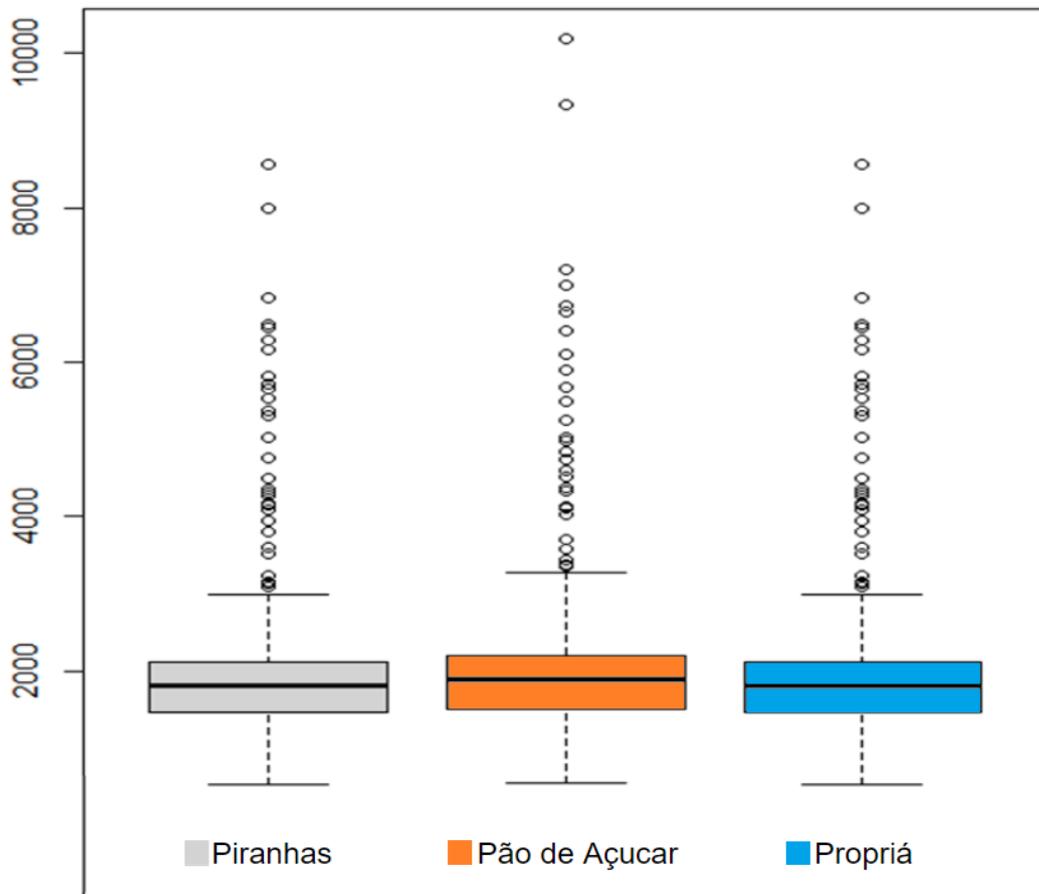
A partir da aplicação do teste de Mann Kendall, Lira e Cardoso (2018) também observaram tendências de redução nas vazões anuais no BCSF (período de 1931 a 2014). No posto fluviométrico localizado em Xingó/AL, os autores observaram redução da ordem de 711 m³/s, e em Sobradinho, a redução observada foi de 726 m³/s.

Com o intuito de comparar o comportamento das vazões anuais entre os municípios da área de estudo, foi elaborado um diagrama de caixas (*boxplot*), o qual é apresentado a seguir, na Figura 10.

A Figura 10 mostra que as vazões referentes aos municípios em análise apresentam um comportamento bastante parecido. Os valores da mediana confirmam esta observação, sendo de 1.769 m³/s em Piranhas/AL, 1.880 m³/s em Pão de Açúcar/AL e 1.802 m³/s em Propriá/SE. A presença e posição dos *outliers* na Figura 10 evidencia uma alta variabilidade anual das vazões dos três municípios, fato que é comprovado pelos elevados valores de desvio padrão e coeficiente de variação observados na Tabela 5.

O comportamento parecido das vazões nestes municípios pode ser explicado pelas características hidro ambientais do trecho do BCSF em análise. Do ponto de vista hidrológico, este trecho do rio São Francisco não possui afluentes com vazões elevadas o suficiente para causar diferenças relevantes entre os pontos. De acordo com Nascimento (2013) a hidrografia da RBS apresenta predominância de rios intermitentes ou temporários, fato que está relacionado às condições climáticas e também as características litológicas presentes no leito destes rios, estando estes encaixados em rochas sedimentares que atuam como acumuladores de água nos seus perfis e porque parte inferior do curso d'água não está sob influência do clima semiárido, fazendo com que eles sejam perenes.

Figura 10 - Diagrama de caixas das vazões médias anuais no baixo curso do Rio São Francisco no período de 1982 a 2020.

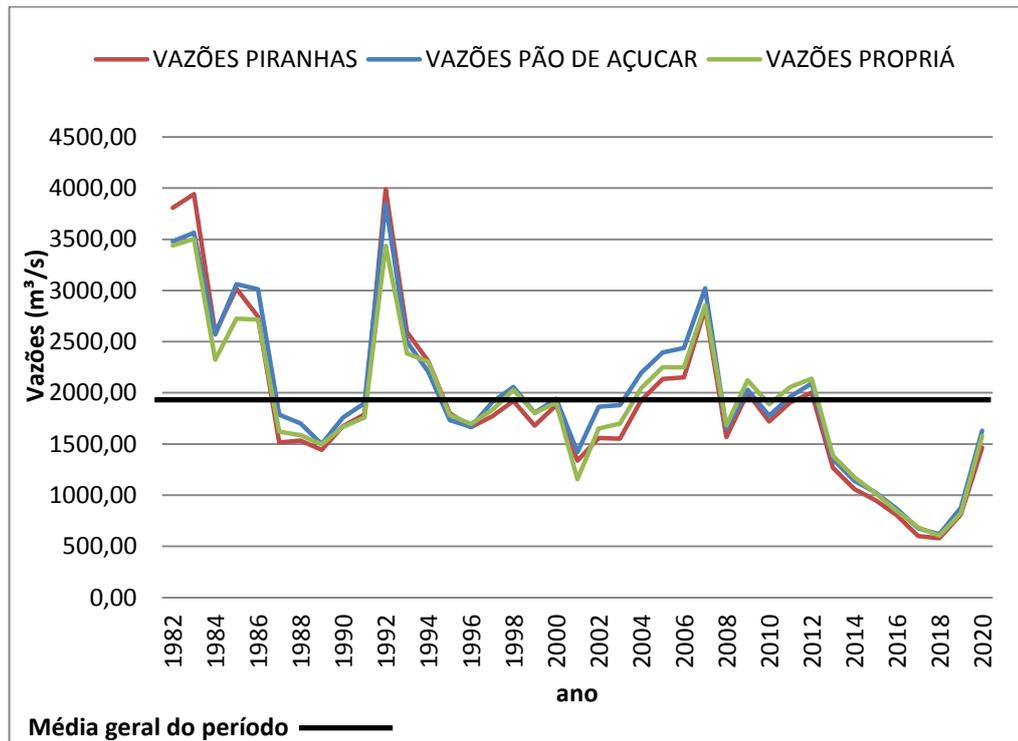


Elaboração: Organizado pelo autor, 2023.

4.2.4. Variabilidade interanual das vazões no baixo curso do rio São Francisco

A variabilidade interanual das vazões no BCSF para os municípios de Piranhas/AL, Pão de Açúcar/AL e Propriá/SE no período de 1982 a 2020 é representada a seguir, na Figura 11.

Figura 11 - Variabilidade interanual das vazões no baixo curso do rio São Francisco entre 1982 e 2020.



Elaboração: Organizado pelo autor, 2023.

A Figura 11 mostra a existência de uma grande proximidade entre as linhas representativas das vazões nos pontos de análise, o que permite constatar novamente a pequena diferença no comportamento fluviométrico entre estes pontos. De uma maneira geral, a Figura 11 demonstra que, embora a operação de controle das vazões tenha atuado no sentido de contenção de cheias e vazões muito baixas, não foi possível evitar que eventuais picos de altas e baixas vazões anuais ocorressem. No entanto, observa-se que os picos registrados após o início das operações da barragem de Sobradinho são menores e menos frequentes que aqueles que ocorriam em períodos anteriores (Figura 12).

Conforme pode ser observado na Figura 12, nos anos de 1982, 1983, 1985, 1992 e 2007, os municípios registraram picos de vazão bastante acima da média geral do período. Nos anos de 1982, 1983 e 1992 foram registradas vazões acima de 3.000 m³/s para os três municípios. No pico ocorrido no ano de 1985, os municípios de Piranhas/AL e Pão de Açúcar/AL apresentaram vazões acima de 3.000 m³/s enquanto em Propriá/SE a vazão registrada foi um pouco inferior, sendo esta de 2.726 m³/s. No pico ocorrido em 2007, o município de Pão de açúcar/AL apresentou vazão acima de

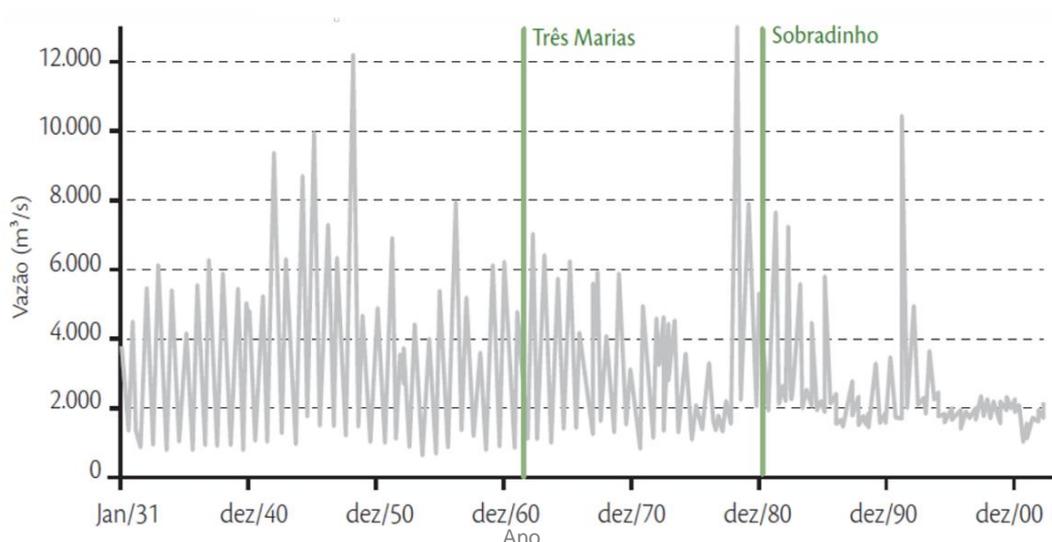
3.000 m³/s, enquanto Piranhas/AL e Propriá/AL tiveram vazões de aproximadamente 2.857 m³/s.

Ao longo dos anos de 1987, 1988, 1989, 1990 e 1991 as vazões dos três municípios ficaram mais próximas da média geral, com valores variando entre 1.500 m³/s e 1.800 m³/s.

Por sua vez, picos de vazões baixas foram registrados nos anos de 1985, 1986, 1988, 2001, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017 e 2018. Salienta-se que o período de 2013 a 2018 ficou marcado por vazões extremamente baixas e por isso será analisado detalhadamente mais a frente, no item 4.2.5.

A variabilidade interanual das vazões do rio São Francisco em Juazeiro/BA entre 1931 e 2000 (Figura 12) mostra que nas décadas que antecedem a construção da barragem de Sobradinho eram mais frequentes os anos de cheia e também os de vazões abaixo da média.

Figura 12 - Evolução da vazão no posto de Juazeiro/BA entre 1931 e 2000.



Elaboração: ANA, 2012.

Conforme a Figura 12, nas décadas anteriores a construção da barragem de Três Marias, era comum a ocorrência de cheias anuais com acumulados que ultrapassavam 6.000 m³/s, chegando a ultrapassar 8.000 m³/s em alguns anos. Neste mesmo período também foram frequentes os anos em que a vazão do rio São Francisco ficou abaixo de 1.000 m³/s.

Após o início das operações da UHE de Três Marias, nota-se uma relevante mudança caracterizada pela ausência de vazões anuais acima de 8.000 m³/s e uma redução na frequência de vazões acima de 6.000 m³/s e abaixo dos 1000 m³/s.

Após início da regulação das vazões na UHE de Sobradinho não ocorreram mais picos acima de 12.000 m³/s e houve apenas três anos em que as vazões ficaram acima de 6.000 m³/s. Neste período, as vazões menores também passaram a ser menos frequentes. A partir de meados da década de 1990, observa-se que as vazões anuais passam a oscilar próximas de 2.000 m³/s, porém, nos anos seguintes ainda foram registrados um pico de vazão elevada (2007) e picos de vazões menores (2001 e período de 2013 a 2018).

Ao analisar o comportamento hidrológico do rio São Francisco nas últimas décadas, Fontes *et al.* (2003) destacam a existência quatro fases distintas. De acordo com estes autores, a primeira fase corresponde ao regime natural do rio e ocorre no período anterior a instalação da barragem de Sobradinho. A segunda fase se dá nos primeiros anos após o início das operações em Sobradinho, entre 1978 e 1987, quando houve uma elevação das vazões mínimas, mas mantiveram-se os picos de vazões anuais característicos do verão. As cheias ao longo deste período continuaram a ocorrer, embora já atenuadas pela regulação. No terceiro período, que se deu entre os anos de 1987 e 1988, as cheias foram substancialmente reduzidas, fato que os autores atribuem ao início das operações em Itaparica, que desempenha um importante papel na retenção das vazões produzidas no Submédio SF. O último período destacado, que vai de 1994 a 2001 ocorre logo após a construção da UHE de Xingó e é marcado pela total ausência de cheias e de vazões mínimas, fato que segundo os autores causou a falsa interpretação de que Xingó seria responsável pelo fim das cheias na RBS, quando na verdade, essa barragem trabalha a fio-d'água e, portanto, não é responsável pela contenção de cheias.

4.2.5. Variabilidade das vazões no baixo curso do rio São Francisco entre 2013 e 2018

A acentuada queda das vazões observada entre 2013 e 2018 (Figura 11) teve como causa principal os eventos climáticos de estiagem e secas que atingiram diversas regiões brasileiras ao longo destes anos. Na região Nordeste, o período de seca que começou em 2012 impactou a disponibilidade hídrica em muitos municípios, com fortes impactos para a agricultura, pecuária, produtores industriais, entre outros (MARENGO, 2016; MARTINS e MAGALHÃES, 2015; SÃO JOSÉ *et al.*,

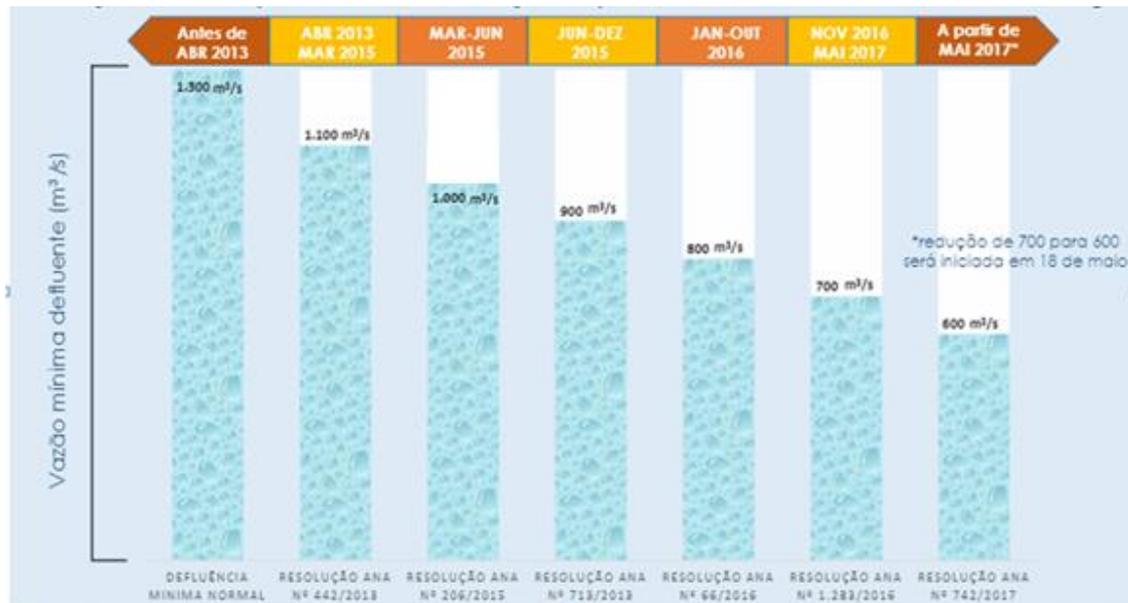
2021; SANTANA E SANTOS, 2020). Neste ano, a seca ainda não havia começado no Sudeste e, portanto, as vazões registradas no BCSF estavam próximas a 2.000 m³/s.

O Sudeste do Brasil, região onde se localizam os afluentes de maior contribuição para as vazões do rio São Francisco (PEREIRA, 2007), foi fortemente impactado pela crise hídrica a partir de 2013, ano em que teve início o período de baixas vazões no BCSF. No ano de 2014, quando a crise hídrica já havia se espalhado para outras regiões, cerca de 1.414 municípios brasileiros publicaram decretos devido à ocorrência de estiagem ou seca, sendo todos classificados como situação de emergência (ANA, 2015).

Diante deste contexto, no início do ano de 2013 a ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico) realizou estudos que mostraram a necessidade de reduzir urgentemente as vazões mínimas a jusante de Sobradinho de 1.300 para 1.100 m³/s visando garantir vazões minimamente capazes de atender a demanda de geração de energia pelas usinas de Itaparica, Paulo Afonso e Xingó, bem como atender aos usos múltiplos da água nesta região (CHESF, 2013).

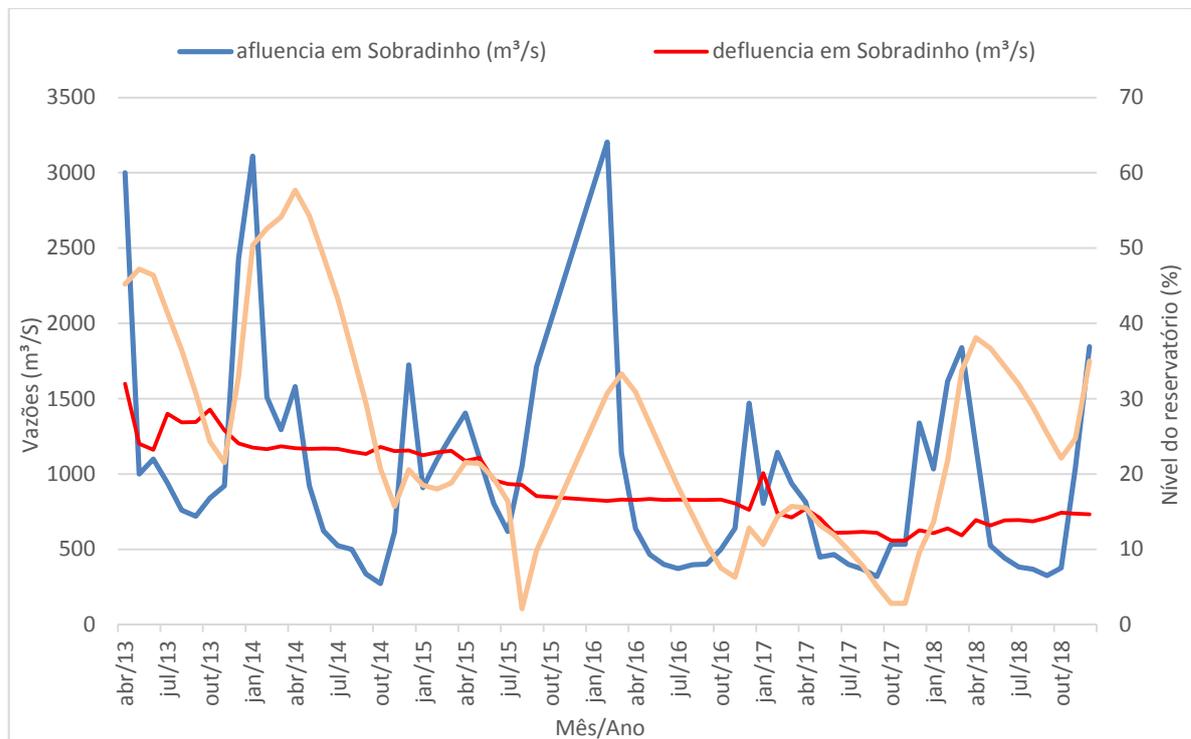
Ao longo dos anos seguintes, a medida que as vazões afluentes da barragem de Sobradinho foram diminuindo e conseqüente o nível do reservatório foi se reduzindo a níveis críticos, novas solicitações de redução foram feitas (CHESF, 2018). A seguir, a Figura 16 mostra os rebaixamentos de vazões autorizados pela ANA entre 2013 e 2017 e em seguida, na Figura 13 são apresentadas as variações das vazões afluentes, defluentes e do nível do reservatório de Sobradinho de 2013 a 2018.

Figura 13 - Resoluções da Agência Nacional das Águas (ANA) que autorizaram a redução do patamar de defluência das hidrelétricas de Sobradinho e Xingó.



Elaboração: ANA, 2017.

Figura 14 - Variabilidade da vazão afluenta, defluente e do nível do reservatório de Sobradinho entre 2013 e 2018.



Elaboração: Organizado pelo autor, 2023.

A Figura 14 mostra que entre abril de 2013 e dezembro de 2018, as afluências em Sobradinho apresentaram variações bruscas, com períodos de

vazões acima de 3.000 m³/s, como foi o caso de abril 2013, novembro a março de 2014 e setembro a março de 2016, intercalando com períodos de vazões bastante baixas, conforme é observado de maio a outubro de 2013, maio a outubro de 2014, maio a agosto de 2015, abril a novembro de 2016, abril a novembro de 2017 e abril a outubro de 2018.

Essa variabilidade das vazões afluentes ao longo dos anos culminou em oscilações bruscas no nível do reservatório, que atingiu níveis bastante baixos, sempre como resposta aos períodos de vazões afluentes baixas.

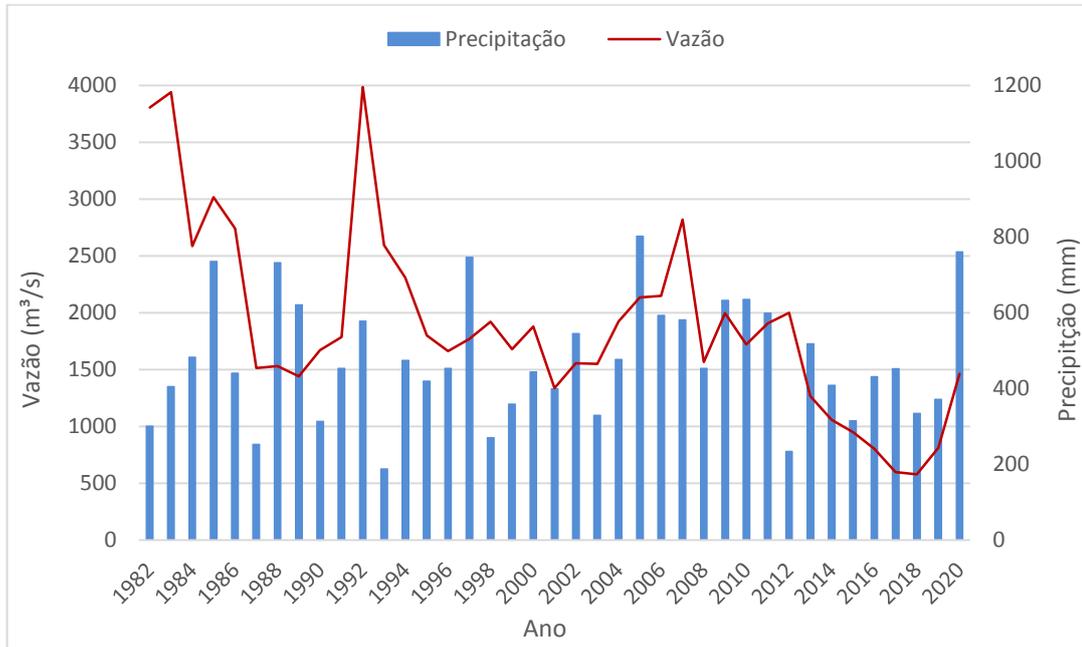
A Figura 14 também mostra que nos períodos em que a vazão afluente atingiu seus picos mais elevados, houve na sequência a elevação do nível do reservatório, que ocorreu com uma defasagem de cerca de 1 a 3 meses. Neste sentido, o pico de vazão afluente de aproximadamente 3.000 m³/s ocorrido em abril de 2013 teve como resposta a elevação do nível do reservatório em maio de 2013. O pico de 3.110 m³/s ocorrido em janeiro de 2014 teve como resposta a elevação do nível do reservatório em abril de 2014. Já o pico de 3.204 m³/s registrado em fevereiro de 2016 teve como resposta a elevação do nível do reservatório em março de 2016. Por fim, o pico de março de 2018, que foi de 1.838 m³/s, teve como resposta o aumento do nível do reservatório em abril de 2018.

Neste contexto, a vazão defluente teve de ser rebaixada continuamente, e não foi contemplada pelas elevações que ocorreram a montante, sendo mantida em um patamar abaixo de 1.000 m³/s a partir de 2015, chegando ao seu momento mais crítico em outubro de 2017, quando ficou abaixo de 520m³/s.

4.2.6. Variabilidade interanual das chuvas e vazões no baixo curso do rio São Francisco.

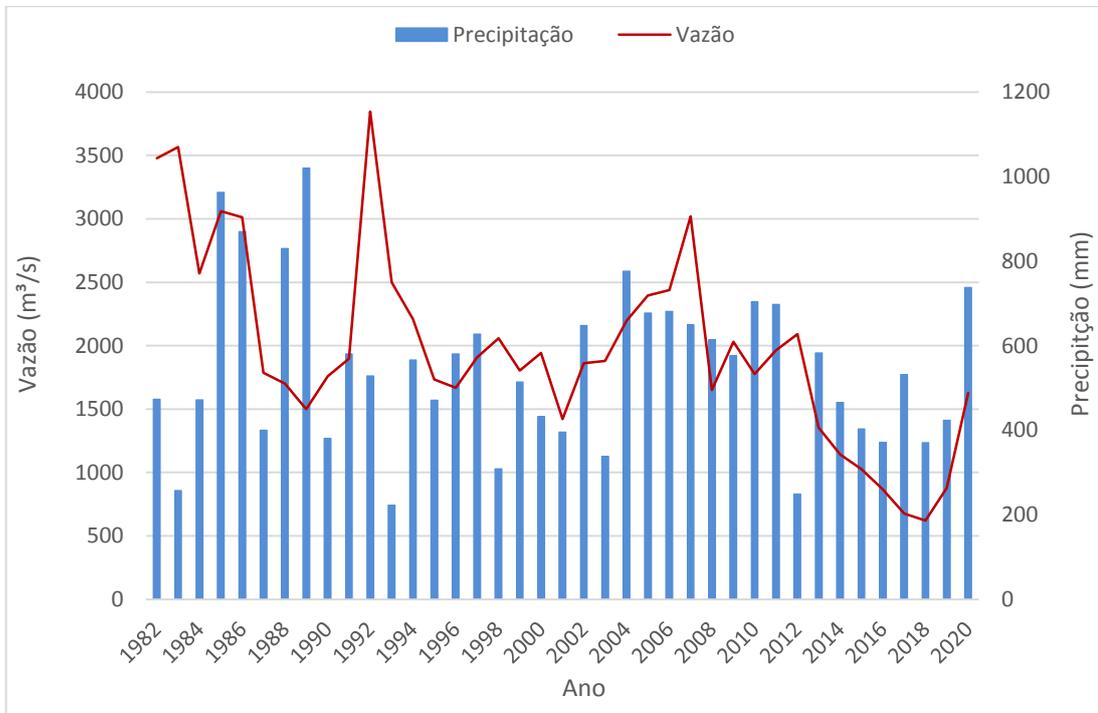
Também foi realizada a análise da variabilidade interanual das chuvas e vazões para os municípios de Piranhas/AL, Pão de Açúcar/AL e Propriá/SE com o intuito de verificar se os anos que apresentaram vazões acima da média coincidem com anos de precipitação acima da média, ou seja, buscou-se verificar mais detalhadamente se existe uma resposta das vazões do BCSF em anos mais chuvosos na RBS. A análise das variabilidades interanuais das chuvas e vazões na RBS é apresentada a seguir, a partir das Figuras 15, 16 e 17.

Figura 15 - Variabilidade interanual das chuvas e vazões no município de Piranhas/AL no período de 1982 a 2020.



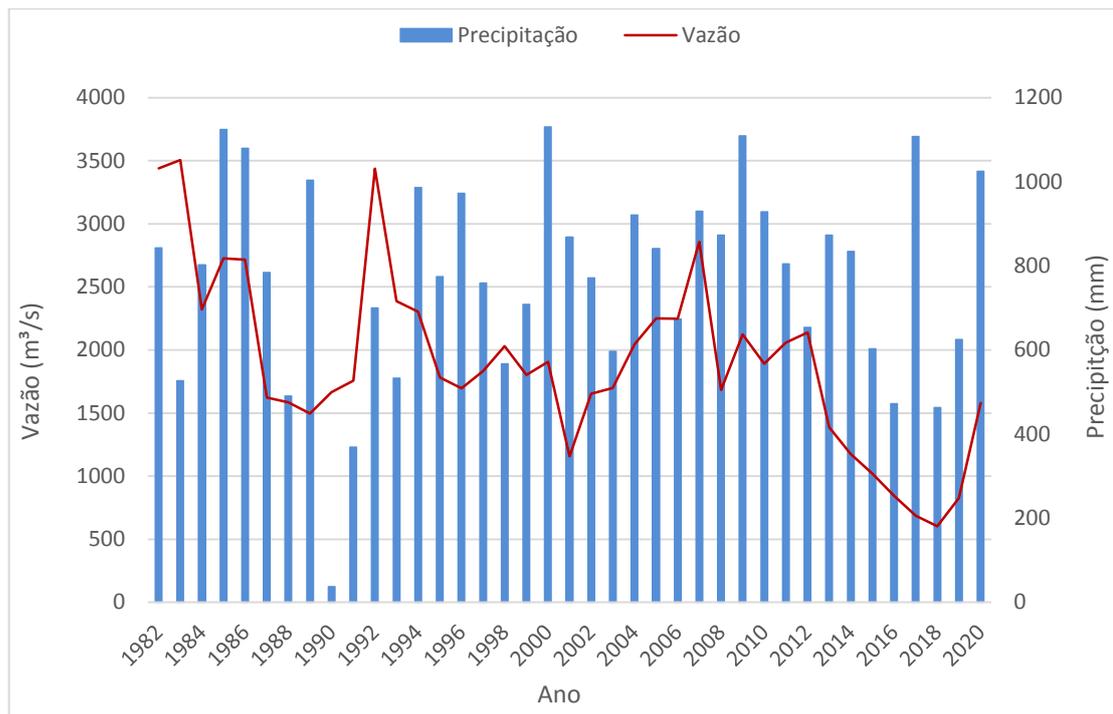
Elaboração: Organizado pelo autor, 2023.

Figura 16 - Variabilidade interanual das chuvas e vazões no município de Pão de Açúcar/AL no período de 1982 a 2020.



Elaboração: Organizado pelo autor, 2023.

Figura 17 - Variabilidade interanual das chuvas e vazões no município de Propriá/SE no período de 1982 a 2020.



Elaboração: Organizado pelo autor, 2023.

A análise da Figura 13 mostra que dos anos em que as vazões em Piranhas/AL estiveram acima da média geral do período, 56% apresentaram quantitativos de precipitação acima da média. Em Pão de Açúcar/AL (Figura 14) dos anos que as vazões estiveram acima da média geral, 53% apresentaram quantitativos de precipitação acima da média. Por fim, dos anos em que as vazões em Propriá/SE estiveram acima da média geral, 64% apresentaram quantitativos de precipitação acima da média.

De maneira geral, ao mostrar que nem todos os anos chuvosos na RBS coincidem com anos de vazões elevadas, esta análise indica haver uma baixa participação das chuvas que ocorrem na RBS na composição das vazões do BCSF. Um fato que reforça esta observação é a baixa correlação apresentada entre a precipitação e vazão para cada local (mencionado nas Figuras 13, 14 e 15) indicando valores próximos a zero (0,0), o que demonstra novamente não haver uma dependência entre a vazão no leito principal do BCSF com a precipitação que nela ocorre. Vale também mencionar que a variabilidade mensal das chuvas e vazões mostra um desencontro entre os períodos de maiores e menores quantitativos, de forma que, o período de vazões mais elevadas (janeiro a abril) coincide com parte

do período de baixas precipitações, e o período de maior precipitação (abril a julho) coincide com parte do período de menores vazões (junho a agosto).

A ausência de correlação entre chuvas e vazões na RBS também pode ser observada pela análise dos eventos climáticos ocorridos na RBS no ano de 2012. Neste ano, embora a precipitação na RBS tenha caído para um nível bastante abaixo da média (menor que 250 mm em Piranhas e Pão de Açúcar), as vazões do BCSF apresentaram valores acima de 2000 m³/s (acima da média), o que demonstra que a queda na precipitação na RBS não influenciou em uma queda nas vazões do BCSF. Somente em 2013, quando a crise hídrica atingiu a região Sudeste, a vazão do BCSF caiu para valores abaixo da média nos municípios em análise. Estes eventos sugerem que a variabilidade das vazões no BCSF está mais associada as condições climáticas predominantes nas regiões fisiográficas a montante da RBS, ou seja, no Alto e Médio SF, do que as condições climáticas predominantes no Baixo São Francisco.

Há, contudo, uma interferência nessa relação que se dá principalmente pela operação da barragem de Sobradinho. Conforme foi observado por Fioreze *et al.* (2012) a operação do reservatório de Sobradinho consiste basicamente em guardar água nos anos chuvosos ou em períodos chuvosos para enfrentamento de anos mais secos ou períodos mais secos. Sendo assim, as cheias do rio São Francisco (produzidas em anos mais chuvosos na região Sudeste) tendem a ser contidas na barragem de Sobradinho, que promoverá a liberação de vazões menores a jusante.

Por outro lado, os períodos de estiagem na região Sudeste tendem a reduzir a magnitude das vazões do rio São Francisco, e assim, tal redução leva a um maior contingenciamento no reservatório de Sobradinho, o que poderá resultar em um rebaixamento das vazões no BCSF (ver análise no item 4.2.5). Essa operação tem como a finalidade manter um volume de vazões adequado para geração de energia nas UHEs localizadas a jusante da barragem de Sobradinho.

Por fim, cabe ressaltar que embora tenham sido observadas tendências significativas positivas na precipitação anual em 28% dos pontos dos pontos analisados, não é possível afirmar que este aumento possa estar causando alguma alteração no quadro observado. Contudo, é possível que a longo prazo este aumento que foi de 5,4 a 11,2 mm ao ano poderá aumentar de forma relevante a participação das chuvas da RBS na composição das vazões do rio São Francisco. No caso das tendências significativas negativas observadas para as vazões no

BCSF, vale ressaltar que não estão relacionadas a variabilidade pluvial da RBS e sim ao controle exercido pelas operações da CHESF.

5. CONCLUSÕES

A finalidade principal do presente estudo foi analisar as variabilidades e as tendências significativas pluviais e fluviais na região fisiográfica do Baixo São Francisco por meio da adoção de procedimentos estatísticos e técnicas geoprocessamento. Diante dos resultados obtidos foi possível concluir que:

- Há uma elevada irregularidade da distribuição das chuvas, espacial e temporalmente na região do Baixo São Francisco;
- As chuvas se concentram na porção sudeste da bacia, a qual se situa mais próxima ao litoral. Também foi observado que os quantitativos de precipitação diminuem a medida que se avança do litoral em direção ao interior, sendo que, a porção oeste da bacia;
- Foram observadas tendências crescentes significativas da precipitação em 18% dos pontos analisados na escala sazonal e em 28% dos pontos na escala anual;
- Foi verificado que ao longo dos meses mais chuvosos (maio a julho) o BCSF entra em seu período anual de menores vazões. Já nos meses menos chuvosos (setembro a fevereiro) é observado um aumento progressivo das vazões;
- Foram verificadas tendências de redução das vazões médias mensais em todos os municípios analisados no BCSF, com quantitativos mais elevados de redução entre os meses de maior vazão (janeiro a abril);
- As vazões médias anuais também apresentaram tendências de redução para todos os municípios analisados, com quantitativos variando entre $-35.84 \text{ m}^3/\text{s}$ e $-42.53 \text{ m}^3/\text{s}$;
- Há uma grande similaridade no comportamento das vazões médias anuais dos municípios analisados no BCSF;
- A variabilidade interanual das vazões no BCSF mostra que a regulação na barragem de Sobradinho reduziu a ocorrência de cheias e vazões baixas, porem, não eliminou estes eventos;

- A variabilidade interanual das chuvas e vazões mostra que existe uma baixa participação das chuvas do Baixo São Francisco na formação das vazões do baixo curso do Rio São Francisco, o que indica que as vazões deste trecho do rio dependem das condições climáticas predominantes nas regiões do Alto e Médio São Francisco, bem como da regulação que ocorre na barragem de Sobradinho;
- Verificou-se que o período de baixas vazões afluentes entre 2013 e 2018 rebaixou o reservatório de Sobradinho para níveis muito críticos, levando a seguidos rebaixamentos das vazões defluentes, com impactos para os múltiplos usuários das águas do BCSF.
- Os resultados aqui apresentados podem ser ferramentas úteis para o planejamento e tomada de decisão na RBS que envolvam questões hidrológicas, sobretudo a variabilidade da precipitação e vazões no BCSF.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil**: informe 2015. Brasília: ANA, 2015. p. 103.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2017**: relatório pleno. Brasília: ANA, 2017, p. 169.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **A questão da água no Nordeste**. 1ª ed. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE), 2012. p. 432.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS/MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL (MDR). **Manual de Usos Consuntivos da Água no Brasil**. Brasília: ANA, 2019. p. 75.
- ALPINO, T. de M. A.; MAZOTO, M. L.; BARROS, D. C.; FREITAS, C. M. de. Os impactos das mudanças climáticas na segurança alimentar e nutricional: uma revisão da literatura. **Ciência & Saúde Coletiva**, v.27, p. 273-286. 2022.
- ALVES, B. C. C; SOUZA FILHO, F de A.; SILVEIRA, C. da S. Análise de tendências e padrões de variação das séries históricas de vazões do Operador Nacional do Sistema (ONS). **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [S. l.], v. 18, n. 4, p. 19-34. 2013.
- ALVES, J.; GONÇALVES, T.; NASCIMENTO, S. A. Precipitação na Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira, Nordeste do Brasil: tendências e variabilidade (1970-2020). **Boletim Do Museu Paraense Emílio Goeldi - Ciências Naturais**, v. 17, n. 2, p. 527-542. maio-ago. 2022.
- AMARAL, A. A. **As chuvas e a erosividade na bacia hidrográfica do rio Jordão – PR**. 2012. 156 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2012.
- ARAÚJO, S. S.; AGUIAR NETTO, A. O. Rizicultura entre a modernidade e a tradição no baixo São Francisco em Sergipe e alagoas. *In*: Simpósio da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, 2016, Petrolina. **Anais [...]**. CBHSF Integrando conhecimentos científicos em defesa do Velho Chico, 2016.
- ARRUDA, D.M.; SCHAEFER, C. E. G. R.; MORAES, M. L. B. Relações entre atributos do solo e vegetações da região ecotonal do médio Rio São Francisco, Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 39, n. 6, p. 1524-1532. dez/2015.
- AYOADE, J. O. **Introdução à climatologia para os trópicos**. 17ªed. Rio de Janeiro: Bertrand, 2013. p. 332.
- BALDO, M. C. **Variabilidade pluviométrica e a dinâmica atmosférica na bacia hidrográfica do rio Ivaí - PR**. 2006. 172 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Centro de Pós-Graduação em Desenvolvimento Regional e Planejamento Ambiental, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2006.
- BARCELLOS, C.; MONTEIRO. A. M. V.; CORVALAN, C.; GURGEL, H. C.; CARVALHO, M. S.; ARTAXO, P.; HACON, S.; HAGONI, V. Mudanças climáticas e ambientais e as doenças infecciosas: cenários e incertezas para o Brasil. **Epidemiol. Serv. Saúde**, Brasília, v. 18, n. 3, p. 285-304. set. 2009.
- BENETTI, A; BIDONE, F. O meio ambiente e os recursos hídricos. *In*: TUCCI, C. E. M. (org.) **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 4.ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2009. p. 849-870.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. São Paulo: Editora Ícone, 1993. p. 355.

BOTELHO, R. G. M.; DA SILVA, A. S. Bacia hidrográfica e qualidade ambiental. *In*: VITTE, A. C.; GUERRA, A. J. T. (Orgs.). **Reflexões sobre a geografia física no Brasil**. 6. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2012. p. 282.

BRASIL. **Lei Federal 9.433** de 8 de janeiro de 1997. Da Política Nacional de Recursos Hídricos, 1997. Brasília: Presidência da República, 1998.

BRASIL. Resolução CONAMA nº357, de 17 de março de 2005. **Classificação de águas, doces, salobras e salinas do Território Nacional**. Publicado no D.O.U. 2005.

CABRAL JÚNIOR, J. B.; LUCENA, R. L. Análises estatísticas da precipitação e temperatura do ar em ambientes semiáridos. **Revista Entre-Lugar**, v. 12, p. 170-191. 2021.

CABRAL JÚNIOR, J.B; SILVA, C. M. S.; ALMEIDA, H. A.; BEZERRA, B. G.; SPYRIDES, M. H. C. Detecting linear trend of reference evapotranspiration in irrigated farming areas in Brazils semiarid region. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 138, p. 215-225. 2019.

CABRAL JÚNIOR, J. B.; BEZERRA, B. G. Análises da evapotranspiração de referência e do índice de aridez para o Nordeste do Brasil. **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 4, p. 71-89. 2018.

CABRAL JÚNIOR, J. B.; LUCENA, R. L. Analysis of precipitation using Mann-Kendall and Kruskal-Wallis non-parametric tests. **Mercator(Fortaleza)**, v. 19, p. 1-14, 2020.

CARVALHO, A. A. D.; MONTENEGRO, A. A. D. A.; SILVA, H. P. D.; LOPES, I.; DE MORAIS, J. E.; DA SILVA, T. G. Trends of rainfall and temperature in Northeast Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 24, p. 15-23. 2019.

CAVALCANTE, G.; MIRANDA, L. B.; MEDEIROS, P. R. P. Circulation and salt balance in the São Francisco river Estuary (NE/Brazil). **RBRH**, v. 22. 2017.

CBHSF – COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO. **Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco 2016-2025**. Belo Horizonte: CBHSF. 2016.

CHESF - Companhia hidrelétrica do São Francisco. **Redução temporária da vazão mínima do rio São Francisco para 550 m³/s, a partir da UHE Sobradinho**. Relatório Mensal de Acompanhamento, 1. jun. 2013.

_____. **Redução temporária da vazão mínima do rio São Francisco para 550 m³/s, a partir da UHE Sobradinho**. Relatório Mensal de Acompanhamento, 3. out. 2013.

_____. **Redução temporária da vazão mínima do rio São Francisco para 550 m³/s, a partir da UHE Sobradinho**. Relatório Mensal de Acompanhamento, 4. dez. 2013.

_____. **Redução temporária da vazão mínima do rio São Francisco para 550 m³/s, a partir da UHE Sobradinho**. Relatório Mensal de Acompanhamento, 9. jul. 2014.

_____. **Redução temporária da vazão mínima do rio São Francisco para 550 m³/s, a partir da UHE Sobradinho**. Relatório Mensal de Acompanhamento, 16. fev. 2015.

_____. **Redução temporária da vazão mínima do rio São Francisco para 550 m³/s, a partir da UHE Sobradinho**. Relatório Mensal de Acompanhamento, 25. jan. 2016.

_____. **Redução temporária da vazão mínima do rio São Francisco para 550 m³/s, a partir da UHE Sobradinho**. Relatório Mensal de Acompanhamento, 26. fev. 2016.

- CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1980. p. 188.
- COELHO NETTO, A. L. Hidrologia de encosta na interface com a Geomorfologia. *In*: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. da. (Org.) **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. 6. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2005. p. 93-148.
- COSTA, M. S.; LIMA, K. C.; ANDRADE, M. M.; GONÇALVES, W. A. A. Tendências observadas em extremos de precipitação sobre a região Semiárida do Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 08, n. 5, p. 1321-1334. 2015.
- CRUZ, M. A. S.; SILVA, C. A.; VIANA, R. D.; GARCIA, C. A. B; COELHO FILHO, P. A.; PRAXEDES, M. Y. A. V.; COSTA, S. S. L. Salinidade da água na região do Baixo São Francisco. *In*: SOARES, E. C.; VIEIRA, J. S.; NAVAS, R. **O Baixo São Francisco: características ambientais e sociais**. Maceió: EDUFAL, 2020. p. 45-53.
- CUNHA, C.J. **Regularização da vazão e sustentabilidade de agroecossistemas no estuário do Rio São Francisco**. 2015. 231 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Geografia do Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, 2015.
- CUNHA, C. de J.; VILLAR, J. W. C.; PINHEIRO, L. de S. A regularização da vazão como indicador de pressão hidrológico e geomorfológico no sistema estuarino do Rio São Francisco. **Sustentare**, Três Corações, MG, ed. especial, p. 55-68. 2018.
- CUNHA, S. B. Impactos geomorfológicos da barragem de Xingó - Baixo curso do rio São Francisco. *In*: SANTOS, M, BECKER, B. K. **Território, territórios: ensaios sobre o ordenamento territorial**. 3 ed. Rio de Janeiro: Lamparina, 2011. p. 352 – 374.
- CUPOLILLO, F. **Diagnóstico hidroclimatológico da bacia do Rio Doce**. 2008. 153 f. Tese de Doutorado em Geografia - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.
- DA SILVA, Djane Fonseca. Detection of climate trends in macroregions of the Ceará State using FUNCEME data. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 38, n. 1, p. 107-114. 2016.
- FAUSTINO, J. **Planificación y gestión de manejo de cuencas**. Turrialba: Catie, 1996. p. 90.
- FLORES, E. F. **Modelagem em Climatologia Geográfica: um ensaio metodológico aplicado ao oeste paulista**. 2000. 237 f. (Tese de Doutorado). UNESP, Rio Claro, 2000.
- FERREIRA, P. F. E.; LOPES, J. R. F.; NERY, A. R. ANÁLISE ESPACIAL DAS TENDÊNCIAS CLIMÁTICAS E SUA INFLUÊNCIA NA AGRICULTURA IRRIGADA NO CEARÁ, BRASIL. **Revista Brasileira de Climatologia**, [S.l.], v. 29. jan. 2022.
- FOLEGATTI, M. V; ROMÁN, R. M. S; COELHO, R. D; FRIZZONE, J. A. Gestão dos recursos hídricos e agricultura irrigada no Brasil. *In*: BICUDO, C. E. de M; TUNDISI, J. G; SCHEUENSTUHL, M. C. B. **Águas do Brasil: Análises estratégicas**. 1. ed. São Paulo: Instituto de Botânica, 2010. p. 15-22.
- FONTÃO, P. A. B. **Ritmo das chuvas na Bacia do Pardo (SP/MG): reflexos na vazão dos rios Pardo e Mogi-Guaçu**. 2014. 127 f. Dissertação (mestrado) Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Rio Claro, 2014.
- FONTES, L. C. S.; HOLANDA, F. S. R.; CASADO, A. P. B.; SANTOS, C. M.; LATRUBESSE, E. E.; CUNHA, S. B. **Estudo do processo erosivo das margens do Baixo São Francisco e seus efeitos na dinâmica de sedimentação do rio**.

Relatório final. Projeto de gerenciamento integrado das atividades desenvolvidas em terra na bacia do São Francisco – GEF São Francisco (ANA/GEF/PNUMA/OEA). Aracaju: UFS/FAPESE, 2003.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). INTERNATIONAL FUND FOR AGRICULTURAL DEVELOPMENT (IFAD). THE UNITED NATIONS CHILDREN'S FUND (UNICEF). WORLD FOOD PROGRAMME (WFP). WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). **The state of food security and nutrition in the world 2018.** Building climate resilience for food security and nutrition. Roma: FAO. 2018.

GERARDI, L. H. de O.; SILVA, B. N. **Quantificação em Geografia.** São Paulo: Editora DIFEL, 1981. p.163.

GOMES, R.S.; LIMA, K. C. Influence of the modes of climate variability in the Tropical Pacific and Atlantic on accumulated rainfall and reservoir water volumes in the Northeast Brazil. **INTERNATIONAL JOURNAL OF CLIMATOLOGY**, v. 01. 2021.

GONÇALVES, M. J. S. Avaliação do impacto ambiental da redução de vazão na foz do Rio São Francisco. *In*: SIMPÓSIO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO. 2016, Juazeiro (BA). **Anais[...]**. Juazeiro (BA), 2016.

GONDIM, J. G. C. F.; FIOREZE, A. P.; MENDONÇA, B. C. DE SÁ.; PINTO, C. G.; COIMBRA, M. R. S. C. A Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco: usos, balanço hídrico, gestão e desafios. *In*: Agência nacional de águas (ANA), Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (Brasil). **A questão da água no Nordeste.** 1ª ed. Brasília, DF: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, Agência Nacional de Águas (CGEE), 2012. p. 157- 179.

HIRATA, R. Recursos hídricos. *In*: TEIXEIRA, W. **Decifrando a Terra.** 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2000. Cap. 20, p. 421-444. 2. Reimpressão. 2003.

HALLEGATTE, S.; BANGALORE, M.; BONZANIGO, L.; FAY, M.; NARLOCH, U.; ROZENBERG, J.; VOGT-SCHILB, A. **Climate Change and Poverty** : An analytical framework. policy research working paper; No. 7126. World Bank Group, Washington: World Bank. p. 47. 2014.

HIERA, M. D.; LIMA JUNIOR, A. F.; ZANELLA, M. E. Tendência da Precipitação no Estado do Ceará. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 24, p. 300-321. 2019.

HOLANDA, F. S. R.; ROCHA, I. P. E OLIVEIRA, V. S. Estabilização de taludes marginais com técnicas de bioengenharia de solos no Baixo São Francisco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, p. 570-575. 2008.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Censo Demográfico 2010.** Rio de Janeiro: IBGE, 2011.

IPCC, 2018. Summary for Policymakers. *In*: **Global Warming of 1.5°C:** An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, p. 3-24.

IPCC, 2021. **Mudança do Clima 2021:** A Base da Ciência Física. Contribuição do Grupo de Trabalho I ao Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental

sobre Mudanças Climáticas [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. No Prelo, 2021. p. 37.

JUNQUEIRA, H. S.; ALMEIDA, L. M. F.; SOUZA, T. S.; NASCIMENTO, P. S.; Análise da variação sazonal e de tendências na precipitação pluviométrica no município de Juazeiro-BA. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [S.l.], v. 13, n. 6, p. 2641-2649. nov. 2020.

JUNQUEIRA, R. A. C. **Mapeamento Temático De Uso Da Terra No Baixo São Francisco**. 1. ed. Brasília: Codevasf, 2002. p. 162.

KENDALL, M. G. **Rank Correlation Measures**. Ed. Charles Griffin. London, 1975.

LIRA, F. A.; CARDOSO, A. de O. Estudo de tendência de vazões de rios das principais bacias hidrográficas brasileiras. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, 21-37. 2018.

MAGRIN, G.O., J.A. MARENGO, J.-P. BOULANGER, M.S. BUCKERIDGE, E. CASTELLANOS, G. POVEDA, F.R. SCARANO, AND S. VICUÑA, 2014: Central and South America. In: **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability**. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [BARROS, V.R., C.B. FIELD, D.J. DOKKEN, M.D. MASTRANDREA, K.J. MACH, T.E. BILIR, M. CHATTERJEE, K.L. EBI, Y.O. ESTRADA, R.C. GENOVA, B. GIRMA, E.S. KISSEL, A.N. LEVY, S. MACCRACKEN, P.R. MASTRANDREA, AND L.L.WHITE (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1499-1566.

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

MARTINS, D. DE M. F.; CHAGAS, R. M.; MELO NETO, J. DE O.; MÉLLO JÚNIOR, A. V. 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. 2011.

MARTINS, E. S. P. R.; MAGALHÃES, A. R. A seca de 2012-2015 no Nordeste e seus impactos. **Parcerias Estratégicas** v. 20, n. 4. 2015.

MARENGO, J. A.; CUNHA, A. P.; ALVES, L. M. A seca de 2012-2015 no semiárido do Nordeste do Brasil no contexto histórico. **Climanálise**, v. 3, n. 1, p. 1-6. 2016.

MEDEIROS, F. J.; OLIVEIRA, C. P.; GOMES, R. S.; SILVA, M. L.; CABRAL JÚNIOR, J. B. Hydrometeorological conditions in the semiarid and east coast regions of Northeast Brazil in the 2012-2017 period. **ANAIS DA ACADEMIA BRASILEIRA DE CIÊNCIAS (ONLINE)**, v. 93, p. 1-15. 2021.

MEDEIROS, F. J.; LUCIO, P. S.; SILVA, H. J. F. Análise de Métodos de Krigagem na Estimativa da Precipitação no Estado do Rio Grande do Norte. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [S.l.], v. 10, n. 5, p. 1668-1676. ago. 2017.

MEDEIROS, P. R. P.; SANTOS, M. M.; CAVALCANTE, G. H.; SOUZA, W. F. L.; SILVA, W. F. Características Ambientais do Baixo São Francisco (AL/SE): Efeitos de Barragens no Transporte de Materiais na Interface Continente-Oceano. **Geochimica Brasiliensis**, Rio de Janeiro, v. 28, n. 2, p. 65-78. 2014.

MEDEIROS, S. E. L. **Análise De Tendências E Padrões Climáticos Para a Mesorregião Do Sertão Paraibano Com ênfase Nas Energias Renováveis**. 2018.

133 f. Dissertação (mestrado) Universidade Federal da Paraíba (UFPB) Centro de Energias Alternativas e Renováveis (CEAR). João Pessoa – PB, 2018.

MMA; COBRAPE-PROJETEC. (2016). **Atualização e complementação do diagnóstico do macrozoneamento ecológico-econômico da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco**: Relatório da Atualização e Complementação do Diagnóstico do Meio Físico-Biótico da BHSF. Ministério do Meio Ambiente: Brasília.

MORA, C.; MCKENZIE, T.; GAW, I. M.; DEAN, J. M.; HAMMERSTEIN, H. V.; KNUDSON, T. A.; SETTER, R. O.; SMITH, C. Z.; WEBSTER, K. M.; PATZ, J. A.; FRANKLIN, E. C. Over half of known human pathogenic diseases can be aggravated by climate change. **Nat. Clim. Chang.** v.12, 869–875. 2022.

MORAIS, R. C. S.; ABREU, L. P. Análise espacial da variabilidade de precipitação na bacia hidrográfica do rio Parnaíba, Nordeste do Brasil. **Revista da Academia de Ciências do Piauí**, v. 2, p. 03-18. 2021.

NASCIMENTO, M. C.; RIBEIRO JÚNIOR, C. E.; AGUIAR NETTO, A.O. **Relatório técnico da campanha de avaliação das mudanças socioambientais decorrentes da regularização das vazões no baixo Rio São Francisco**. Maceió: CBHSF, 2013, p.175.

PEDROSA, V. **A operação hidráulica dos reservatórios do rio São Francisco**: para entender os serviços prestados pelos reservatórios e o uso múltiplo das águas. 1. ed. Maceió: Ed. do Autor, 2023. p. 71.

PEREIRA, S. B.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D.; RAMOS, M. M. Estudo do comportamento hidrológico do Rio São Francisco e seus principais afluentes. **Revista Brasileira De Engenharia Agrícola E Ambiental**, v. 11, n. 6. 2007.

PIANA, C.F. de B.; MACHADO, A. de A.; SELAU, L. P. R. **Estatística Básica**. Pelotas: UFPel, Instituto de Física e Matemática. 2013.

PIROLI, E. L. **Água e bacias hidrográficas**: planejamento, gestão e manejo para enfrentamento das crises hídricas [online]. São Paulo: Editora UNESP, 2022. p. 141.

PORTO, M. F. A; PORTO, R. L. L. Gestão de bacias hidrográficas. **Estudos Avançados** [online], v. 22, n. 63, p. 43-60. 2008.

POUSA, R.; COSTA, M. H.; PIMENTA, F. M.; FONTES, V. C.; BRITO, V. F. A. D.; CASTRO, M. Climate change and intense irrigation growth in Western Bahia, Brazil: The urgent need for hydroclimatic monitoring. **Water**, v. 11, n. 5, p. 933. 2019.

RODRIGUES, C; ADAMI, S. Técnicas de hidrografia. *In*: VENTURI, L A. B. (Org.). **Geografia**: Práticas de Campo, laboratório e Sala de Aula. São Paulo: Editora Sarandi, 2011. p. 55-82.

RODRIGUES, D. T.; SILVA, C. M. S.; REIS, J. S.; PALHARINI, R. S. A.; CABRAL JÚNIOR, J. B.; SILVA, H. J. F.; MUTTI, P. R.; BEZERRA, B. G.; GONCALVES, W. A. Evaluation of the Integrated Multi-SatellitE Retrievals for the Global Precipitation Measurement (IMERG) Product in the São Francisco Basin (Brazil). **Water**, v. 13, p. 1-12. 2021.

RODRIGUES, J. M. Espacialização das chuvas em uma bacia hidrográfica no semiárido da Paraíba. **Revista de Geociências do Nordeste** , Caicó, v.6, n.1, p.28-35. 2020.

SA, I. B.; SÁ, I. I. S.; SILVA, A. de S.; SILVA, D. F. Caracterização ambiental do Vale do Submédio São Francisco. *In*: LIMA, M. A. C. de; SA, I. B.; KIILL, L. H. P.; ARAUJO, J. L. P.; BORGES, R. M. E.; LIMA NETO, F. P.; SOARES, J. M.; LEO, P. C. de S.; SILVA, P. C. G. da; CORREIA, R. C.; SILVA, A. de S.; SÁ, I. I. S.; SILVA, D. F. **Subsídios técnicos**

para a indicação geográfica de procedência do Vale do Submédio São Francisco: uva de mesa e manga. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2009.

SAMPAIO, G. O. Seasonal, interannual and long term variability of the Hydrometeorology of the São Francisco River basin (Northeast Brazil), and their physical links to tropical-extratropical SSTs. Final Report, I1 Workshop on regional climate i prediction and applications-Tropical Atlantic Basin. **Proceedings...**Oklahoma: Oklahoma University. 2001.

SÃO JOSÉ, R. V.; COLTRI, P. P.; GRECO, R.; MELO, H. L. DA S. DE; SANTOS, K. A. DOS; SOUZA, I. S. DE. Seca extrema de 2012 no semiárido baiano e seus impactos: informações climáticas difundidas pela mídia. **Revista Brasileira de Climatologia**, [S.l.], v. 29, nov. 2021.

SANCHES, R. G.; PEREIRA, D. N. B. Climatologia: contribuições à dinâmica climática. *In*: VECCHIA, F. A. da S.; TECH, A. R. B; NEVES, G. Z. de F. (orgs.). **Climatologia dinâmica: conceitos, técnicas e aplicações**. 1. ed. São Carlos: Rima Editora, 2020. p. 4-53.

SANTANA, A. S.; SANTOS, G. R. Impactos da seca de 2012-2017 na região semiárida do Nordeste: notas sobre a abordagem de dados quantitativos e conclusões qualitativas. **Boletim Regional, Urbano e Ambiental (IPEA)**. Brasília, v. 22, p. 119-129, jan./jun. 2020.

SANTOS, A. C. DE A., OLIVEIRA, D. V. F., SENA, M. P. Caracterização da ictiofauna do baixo curso do Rio São Francisco visando a avaliação da qualidade do ecossistema aquático. *In*: I Simpósio da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, 2016, Petrolina. **Anais [...]**. Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (CBHSF) Integrando conhecimentos científicos em defesa do Velho Chico, 2016.

SANTOS, N. D. Q.; LIMA, K. C.; SPYRIDES, M. H. C. The dependence of hydropower planning in relation to the influence of climate in Northeast Brazil. **PloS one**, v. 17, p. 1-14. 2022.

SANTOS, R. da S. **Variação temporal da carga de nutrientes e clorofila no Baixo São Francisco para os anos de 2008, 2009 e 2010**. 2020. 91 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Geografia, Desenvolvimento e Meio Ambiente, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2020.

SERGIPE. SEPLANTEC, SRH - Secretaria de Estado do Planejamento e da Ciência e Tecnologia do estado de Sergipe. **Informes Municipais**. Aracaju: SEPLANTEC, 2000. p. 75.

SILVA, A. M.; SCHULZ, H. E.; CAMARGO, P. B. **Erosão e hidrossedimentologia em bacias hidrográficas**. São Carlos: Rima, 2003. p. 140.

SILVA, E. H. D. L.; SILVA, F. D. D. S.; JUNIOR, R. S. D. S.; PINTO, D. D. C.; COSTA, R. L.; GOMES, H. B.; CABRAL JÚNIOR, J. B.; DE FREITAS, I. G. F.; HERDIES, D. L. Performance Assessment of Different Precipitation Databases (Gridded Analyses and Reanalyses) for the New Brazilian Agricultural Frontier: SEALBA. **Water**, v. 14, 1473, 2022.

SILVA, E. R. A. C.; GALVÍNCIO, J. D.; NASCIMENTO, K. R. P.; SANTANA, S. H. C. de; SOUZA, W. M. de; COSTA, V. S. de O. Análise da tendência temporal da precipitação pluviométrica interanual e intra-anual no semiárido pernambucano. **Revista Brasileira De Climatologia**, v. 22. 2021.

- SILVA, J. D. S.; CABRAL JÚNIOR, J. B.; RODRIGUES, D. T.; SILVA, F. D. D. S. Climatology and significant trends in air temperature in Alagoas, Northeast Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 151, p.1805-1824. fev. 2023.
- SILVEIRA, A. L. L. Ciclo hidrológico e bacia hidrográfica. *In*: TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2009. p. 943.
- SILVEIRA, P. G. Energia e mudanças climáticas: impactos socioambientais das hidrelétricas e diversificação da matriz energética. **Brasileira Opinião Jurídica**, v. 17, p. 123-147. Jan/jun. 2018.
- SOARES, E. C.; SILVA, J. V.; NAVAS, R. **O Baixo São Francisco: características ambientais e sociais**. 1. ed. Maceió, AL: EDUFAL, 2020. p. 401.
- SOUZA, T. S.; NASCIMENTO, P. S. Tendência da Precipitação Pluviométrica e do Balanço Hídrico Climatológico na região hidrográfica do Paraguaçu – BA. **Caderno de Geografia (PUC Minas)**, v. 31, n.67, p. 952-974, 2021.
- SOUZA, E. C. A. M. **Regime pluviométrico na Bacia Hidrográfica do Rio Ivinhema-MS no período de 1977 a 2006**. 2013. 188 p. Dissertação (Mestrado em Geografia) Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2013.
- STURGES, H. A. The Choice of a Class Interval: Journal of American Statistical Association, n. 21, p. 65-66, 1926 apud GERARDI, L. H. O.; SILVA, B. C. M. N. **Quantificação em geografia**. São Paulo: Difel, 1981. p.161.
- UNESCO World Water Assessment Programme. **Relatório Mundial das Nações Unidas sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 2020: água e mudança climática**, resumo executivo. UNESCO, 2020, p.11.
- VALE, T.M.C.; SPYRIDES, M.H.C; CABRAL JÚNIOR; J.B.; ANDRADE, L.M.B.; BEZERRA, B.G.; RODRIGUES, D.T.; MUTTI, P.D. Climate and water balance influence on agricultural productivity over the Northeast Brazil. **Research Square**. may. 2022.
- VILLELLA, S. M; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. 1. ed. São Paulo. Editora McGraw Hill do Brasil, 1975, p. 245.
- XAVIER, A. C.; KINGB, C. W.; SCANLON, B. R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013). **International Journal of Climatology**, Wiley Online Library, v. 36, p. 2644-2659, out. 2016.
- ZANDONADI, L. **As chuvas na bacia hidrográfica do rio Paraná, Brasil: um estudo do ritmo climático e algumas considerações sobre a vazão hídrica**. 2013. 205 f. Tese - (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro, 2013.
- YAMAMOTO, J. K. **Estatística, análise e interpolação de dados geoespaciais**. São Paulo. Gráfica Paulo's, 2020. p. 308.
- ZEZZO, L. V.; COLTRI, P. P.; DE MIRANDA, M. J.; ZULLO JÚNIOR, J. Doenças infecciosas no contexto das mudanças climáticas e da vulnerabilidade socioambiental. **Revista Brasileira De Climatologia**, v. 28, p. 671–697. 2021.