



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas – Departamento de Engenharia
Urbana
Curso de Graduação em Engenharia Urbana



Isabela Veiga de Souza

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA CONSTRUÇÃO DA USINA
HIDRELÉTRICA DE SOBRADINHO (BA) NO REGIME DE VAZÕES
DO RIO SÃO FRANCISCO**

Ouro Preto, MG

2024

AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA CONSTRUÇÃO DA USINA HIDRELÉTRICA DE SOBRADINHO (BA) NO REGIME DE VAZÕES DO RIO SÃO FRANCISCO

Isabela Veiga de Souza

Relatório do Projeto Final de Curso
apresentado como parte dos requisitos
para obtenção do Título de Bacharel em
Engenharia Urbana na Universidade
Federal de Ouro Preto

Data da aprovação: 22/11/2024

Áreas de concentração: Recursos Hídricos e Planejamento Urbano e Regional

Orientadora: Prof^a Dra. Aline de Araújo Nunes

Coorientadora: Prof^a Dra. Bárbara Cristina Mendanha Reis

Ouro Preto, MG

2024

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S729a Souza, Isabela Veiga de.

Avaliação do impacto da construção da usina hidrelétrica de Sobradinho (BA) no regime de vazões do rio São Francisco. [manuscrito] / Isabela Veiga de Souza. - 2024.

105 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.

Orientadora: Profa. Dra. Aline de Araújo Nunes.

Coorientadora: Profa. Dra. Bárbara Cristina Mendanha Reis.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Urbana .

1. Comunidade urbana - Desenvolvimento. 2. Usinas hidrelétricas. 3. Abastecimento de água. I. Nunes, Aline de Araújo. II. Reis, Bárbara Cristina Mendanha. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 62:711.4

Bibliotecário(a) Responsável: Soraya Fernanda Ferreira e Souza - SIAPE: 1.763.787



FOLHA DE APROVAÇÃO

Isabela Veiga de Souza

Avaliação do impacto da construção da usina hidrelétrica de Sobradinho (BA) no regime de vazões do rio São Francisco

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Urbana da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Urbana

Aprovada em 22 de novembro de 2024

Membros da banca

Doutora - Aline de Araújo Nunes - Orientadora (Universidade Federal de Ouro Preto)
Doutora - Bárbara Cristina Mendanha Reis - (Universidade Federal de Ouro Preto)
Mestre - Maria Luiza Teófilo Gandini - (Universidade Federal de Ouro Preto)
Doutor - Denis Furstenau Plec - (Universidade Federal de Ouro Preto)

Aline de Araújo Nunes, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 11/12/2024



Documento assinado eletronicamente por **Aline de Araujo Nunes, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 11/12/2024, às 14:36, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0826415** e o código CRC **3504700D**.

*“O homem chega e já desfaz a natureza
Tira gente, põe represa, diz que tudo vai
mudar.*

*O São Francisco, lá pra cima da Bahia
Diz que dia menos dia vai subir bem devagar
E passo a passo vai cumprindo a profecia
Do beato que dizia que o sertão ia alagar.”*

*Música: Sobradinho
(Sá e Guarabyra)*

RESUMO

A Usina Hidrelétrica de Sobradinho, localizada a montante dos municípios de Juazeiro (BA) e Petrolina (PE), causou alterações significativas na disponibilidade hídrica da região do semiárido, especialmente para os municípios situados a jusante da estrutura, contribuindo significativamente para o desenvolvimento urbano e polo Juazeiro-Petrolina, na região do Submédio São Francisco. Nesse contexto, o presente estudo avaliou o comportamento hidrológico do rio São Francisco, utilizando dados das estações fluviométricas de Juazeiro (BA) e Santa Maria da Boa Vista (PE), no período de 1914 a 2021, abrangendo os intervalos pré e pós-construção da usina hidrelétrica (1973). A análise foi conduzida com o uso de fluviogramas, cotogramas e curvas de permanência, a partir do tratamento e manipulação de dados consistidos disponibilizados pelo portal Hidroweb. Os resultados obtidos evidenciaram o efeito da regularização das vazões, com uma redução percentual média de aproximadamente 33% nas vazões máximas (Q_5). Todavia, foi observada uma redução inesperada de 1% a 13% nas vazões mínimas (Q_{90} e Q_{95}), sendo esse comportamento incoerente ao tipo de operação do barramento. As vazões máximas (Q_5) e mínimas (Q_{95}) aferidas foram, respectivamente, de 4.477,92 m³/s e 872,36 m³/s na estação de Juazeiro (BA), e de 4.350,92 m³/s e 801,31 m³/s na estação de Santa Maria da Boa Vista (PE), para o período pós implementação de Sobradinho. Apesar das inconsistências nas vazões mínimas Q_{90} e Q_{95} , os resultados indicaram eficácia no processo de regularização, com a redução os impactos de grandes cheias nas regiões à jusante. Além disso, o controle das vazões durante os períodos de estiagem contribuiu para o abastecimento público e desenvolvimento socioeconômico dos municípios da região.

Palavras-chave: Disponibilidade hídrica; Regularização de Vazões; Controle de Cheias; Abastecimento, Desenvolvimento Urbano.

ABSTRACT

The Sobradinho Hydroelectric Power Plant, located upstream of the municipalities of Juazeiro (BA) and Petrolina (PE), caused significant changes in the water availability of the semi-arid region, especially for the cities situated downstream of the structure. It contributed significantly to the urban development of the Juazeiro-Petrolina area, in the Submédio São Francisco region. In this context, the present study evaluated the hydrological behavior of the São Francisco River, using data from the fluviometric stations of Juazeiro (BA) and Santa Maria da Boa Vista (PE) from 1914 to 2021, covering the periods before and after the construction of the hydroelectric plant (1973). The analysis was conducted using flow graphs, cotograms, and permanence curves, based on the treatment and manipulation of consistent data provided by the Hidroweb portal. The results showed the effect of flow regulation, with an average percentage reduction of approximately 33% in maximum flows (Q_5). However, an unexpected reduction of 1% to 13% was observed in minimum flows (Q_{90} and Q_{95}), which was inconsistent with the expected behavior of the dam's operation. The maximum (Q_5) and minimum (Q_{95}) flows recorded were 4,477.92 m³/s and 872.36 m³/s, respectively, at the Juazeiro (BA) station, and 4,350.92 m³/s and 801.31 m³/s at the Santa Maria da Boa Vista (PE) station for the post-Sobradinho implementation period. Despite the inconsistencies in the minimum flows Q_{90} and Q_{95} , the results indicated the effectiveness of the regulation process, with the reduction of the impacts of large floods in the downstream regions. Moreover, the control of flows during drought periods contributed to public water supply and the socioeconomic development of the cities in the region.

Keywords: Water availability; Flow regulation; Flood control; Public water supply; Urban development.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Divisão das Regiões Hidrográficas brasileiras.	8
Figura 2 - Distribuição das Estações da RHN.	13
Figura 3 - Molinete Fluviométrico Universal Marca Medir.	16
Figura 4 - Exemplo de flutuadores.	16
Figura 5 - Medição ADCP.	17
Figura 6 - Funcionamento Ecossonda.	18
Figura 7 - Fluviograma das vazões do Rio Iguaçu em Salto Osório.	22
Figura 8 – Vazões afluentes e defluentes no reservatório de Sobradinho no primeiro quadrimestre de 2020.	23
Figura 9 – Permanência de vazões para as estações de Piranhas (A), Pão de Açúcar (B), Traipu (C) e Propriá (D).	24
Figura 10 - Precipitação média anual no Brasil de 1977 a 2006.	26
Figura 11 - Gráfico usos de barragens no Brasil.	31
Figura 12 - Fluxograma de Estruturação do Trabalho.	32
Figura 13 - Biomas da Bacia São Francisco.	34
Figura 14 - Localização da Usina Hidrelétrica de Sobradinho.	36
Figura 15 – Elementos da Usina Hidrelétrica de Sobradinho.	38
Figura 16 - Usina Hidrelétrica de Sobradinho.	39
Figura 17 - Localização das Estações Fluviométricas.	40
Figura 18 – Fluviograma – Comparativo - Estação nº 48020000.	47
Figura 19 – Curva de Permanência de Vazões – Comparativo - Estação nº 48020000.	48
Figura 20 – Normalidade Vazão - Estação nº 48020000.	49
Figura 21 – Cotograma – Comparativo - Estação nº 48020000.	53
Figura 22 – Curva de Permanência de Cotas – Comparativo - Estação nº 48020000.	53
Figura 23 – Normalidade Cotas - Estação nº 48020000.	54
Figura 24 – Fluviograma – Comparativo - Estação nº 48290000.	57
Figura 25 – Curva de Permanência de Cotas – Comparativo - Estação nº 48290000.	57
Figura 26 – Normalidade Vazão - Estação nº 48290000.	58

Figura 27 – Cotograma – Comparativo - Estação nº 48290000.....	61
Figura 28 – Curva de Permanência de Cotas – Comparativo - Estação nº 48290000.	61
Figura 29 – Normalidade Cotas - Estação nº 48290000.	62
Figura 30 – Seção Transversal - Estação nº 48020000.	65
Figura 31 – Seção Transversal 1984 a 1994 - Estação nº 48020000.	66
Figura 32 – Seção Transversal 1998 a 2002 - Estação nº 48020000.	67
Figura 33 – Seção Transversal 1998 a 2002 - Estação nº 48020000.	68
Figura 34 – Seção Transversal - Estação nº 48290000.	69
Figura 35 – Seção Transversal 1980 a 1990 - Estação nº 48290000.	70
Figura 36 – Seção Transversal 2000 a 2008 - Estação nº 48290000.	71
Figura 37 – Seção Transversal 2008 a 2014 - Estação nº 48290000.	72
Figura 38 – Seção Transversal 2008 a 2016 - Estação nº 48290000.	73
Figura 39 – Vazão de Consumo Humano – Juazeiro.....	77
Figura 40 – Vazão de Consumo Irrigação – Juazeiro	78
Figura 41 – Vazão de Consumo Humano - Santa Maria da Boa Vista.....	79
Figura 42 – Vazão de Consumo Dessedentação Animal - Santa Maria da Boa Vista	80
Figura 43 – Vazão de Consumo Irrigação – Santa Maria da Boa Vista	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Panorama da Disponibilidade Recursos Hídricos nas Bacias Hidrográficas Brasileiras no ano de 2005.....	9
Tabela 2 – Critérios considerados.....	11
Tabela 3 - Principais impactos de barragens Usinas Hidrelétricas.....	29
Tabela 4 - Características regiões fisiográficas da bacia hidrográfica do São Francisco.	34
Tabela 5 – Ficha Técnica da Usina Hidrelétrica de Sobradinho.....	37
Tabela 6 - Informações das Estações.	41
Tabela 7 – Variação das Vazões Antes e Após a UHE - Estação nº 48020000.....	48
Tabela 8 – Resultados do teste t Pareado - Vazões - Estação nº 48020000.	49
Tabela 9 – Variação das Cotas Antes e Após UHE - Estação nº 48020000.	54
Tabela 10 – Resultados do Teste t pareado – Cotas - Estação nº 48020000.	55
Tabela 11 – Variação das Vazões Antes e Após UHE - Estação nº 48290000.....	58
Tabela 12 – Resultados do teste de Postos Sinalizados de Wilcoxon - Vazão - Estação nº 48290000	59
Tabela 13 – Variação das Cotas Antes e Após UHE - Estação nº 48290000	62
Tabela 14 - Resultados do teste de Postos Sinalizados de Wilcoxon - Vazão - Estação nº 48290000	63
Tabela 15 – Restrições do reservatório de Sobradinho	74

LISTA DE EQUAÇÕES

(Equação 1).....	19
(Equação 2).....	20

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

ADCP – *Acoustic Doppler Current Profiler*

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento

ASA – Articulação Semiárido Brasileiro

BA – Bahia

BEN – Balanço Energético Nacional

BSF – Baixo São Francisco

CHESF – Comitê de Bacias Hidrográfica do rio São Francisco

CNRH - Conselho Nacional de Recursos Hídricos

CODEVASP – Companhia de Desenvolvimento dos vales do São Francisco e Parnaíba

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente

CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

DAEE/SP - Departamento de Águas e Energia Elétrica de São Paulo

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ICOLD - International Commission on Large Dams

IGAM/MG - Instituto Mineiro de Gestão das Águas

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada

IQA - Índice de Qualidade das Águas

OD - Oxigênio Dissolvido

ODS – Objetivo de Desenvolvimento Sustentável

ONU - Organização das Nações Unidas

PAE - Plano de Ação de Emergência

PBHSF – Plano da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco

PE – Pernambuco

pH - Potencial Hidrogeniônico

PNRH – Plano Nacional de Recursos Hídricos

RHN - Rede Hidrometeorológica Nacional

SGB – Serviço Geológico do Brasil

SNIRH - Sistema Nacional de Informações dos Recursos Hídricos

SNISB - Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens

TSM - Temperatura da Superfície do Mar

TSM - Temperatura da Superfície do Mar

UHE – Usina Hidrelétrica

USB – Usina de Sobradinho

ZCIT - Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	JUSTIFICATIVA	3
3.	OBJETIVOS	5
3.1.	Objetivo Geral	5
3.2.	Objetivos Específicos	5
3.3	Estrutura do Trabalho	5
4.	REFERENCIAL TEÓRICO	7
4.1.	Disponibilidade Hídrica	7
4.2.	Monitoramento das Agências de Regulamentação e Empresas	12
4.2.1.	Medição de Vazão	15
4.2.2.	Perfil Transversal da Seção de Medição	18
4.2.3.	Curva de Descarga (Curva-Chave)	19
4.2.4.	Curva de Permanência	20
4.3.	Regime de Vazões	21
4.4.	Variações Climatológicas no Brasil	25
4.5.	Impactos da Implementação de Barragens de Regularização de Vazões	27
4.6.	Histórico de Barragens de Usinas Hidrelétricas no Brasil	30
5.	METODOLOGIA	32
5.1.	Estruturação e Organização do Trabalho	32
5.2.	Caracterização da Área de Estudo	33
5.3.	Seleção das Estações Fluviométricas	40
5.4.	Tratamento e Manipulação dos Dados	42
5.4.1.	Regime de Vazões e Cota	43
5.4.2.	Análise Estatística	44
5.5.	Seção Transversal	46
5.6.	Impactos da Regularização no Meio Urbano	46

6.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	47
6.1.1.	Regime de Vazões e Cota.....	47
6.1.2.	Regime de Vazões - Juazeiro (BA)	47
6.1.3.	Regime de Cotas - Juazeiro (BA).....	53
6.1.4.	Regime de Vazão - Santa Maria da Boa Vista (PE)	57
6.1.5.	Regime de Cotas - Santa Maria da Boa Vista (PE)	61
6.2.	Seção Transversal.....	65
6.2.1.	Seção Transversal - Juazeiro (BA).....	65
6.2.1.1.	Entre 1984 e 1994:.....	66
6.2.1.2.	De 1998 a 2002:.....	67
6.2.1.3.	De 2002 a 2012:.....	68
6.2.2.	Seção Transversal - Santa Maria da Boa Vista (PE).....	68
6.2.2.1.	De 1980 a 1990:.....	70
6.2.2.2.	De 2000 a 2008	71
6.2.2.3.	De 2008 a 2014	72
6.2.2.4.	De 2008 a 2016.....	73
6.3.	Impactos da Regularização no Meio Urbano.....	74
6.3.1.	Município de Juazeiro.....	76
6.3.1.1.	Demanda Hídrica – Usos Consuntivos.....	77
6.3.2.	Município de Santa Maria da Boa Vista.....	78
6.3.2.1.	Demanda Hídrica – Usos Consuntivos.....	79
7.	CONCLUSÕES	82
7.1.	Sugestões para trabalhos futuros.....	82
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84

1. INTRODUÇÃO

A água é utilizada de diversas maneiras, desde o fornecimento de água potável para consumo humano até a irrigação de plantações, a produção industrial e a geração de energia hidrelétrica, entre diversas outras atividades. Todas essas aplicações são cruciais para a sobrevivência e o bem-estar da humanidade (OLIVEIRA; GOMES, 2009).

Os conflitos em relação à utilização da água estão diretamente ligados à diversidade de usos e ao crescimento da demanda. Esse problema é agravado em áreas urbanas densamente povoadas e em regiões com escassez hídrica, onde a falta de água é resultado de fatores naturais e humanos, como contaminação, desperdício, aumento da demanda e a redução do potencial de oferta natural (MARTINS *et al.*, 2011).

O Brasil é privilegiado por possuir uma grande quantidade de água doce, representando cerca de 13% da disponibilidade mundial (BRITO; SILVA; PORTO, 2007). No entanto, mesmo com essa abundância, o recurso hídrico é mal distribuído espacial e temporalmente, resultando em escassez em determinadas regiões do país, principalmente na região do semiárido, onde as condições climáticas apresentam baixos níveis pluviométricos e elevada evapotranspiração, tornando a gestão dos recursos hídricos ainda mais desafiadora.

A construção de barragens de regularização de vazão é uma medida importante para combater a escassez de água, permitindo seus usos múltiplos, como geração de energia por hidrelétricas, abastecimento urbano ou rural (irrigações), navegação, atenuação de cheias, controle de estiagens, entre outras atividades.

Diante desse contexto, Nunes (2020) associa o desenvolvimento socioeconômico do país à sua disponibilidade hídrica e energética, requisitos esses atendidos e otimizados por meio da construção de barragens. Desde o início da história, as barragens foram fundamentais para o desenvolvimento da sociedade, uma vez que possibilitam combater a escassez de água durante os períodos de seca e garantir o seu armazenamento em períodos de cheia.

A ocupação recente do Baixo São Francisco por atividades agrícolas modernas, a exploração dos recursos naturais e a construção de barragens e seus impactos na dinâmica ambiental são aspectos que se associam a grandes preocupações de ordem socioambientais na região, pois o uso e ocupação do espaço têm ocorrido de forma desordenada e desproporcional às renovações dos recursos, além de maximizada pelos efeitos antrópicos ao canal fluvial.

Entretanto, o processo de regularização da vazão por barragens de Usinas Hidrelétricas (UHE) pode gerar diversos problemas na dinâmica ambiental. Para Cunha (2015) o Rio São Francisco está inserido nesta problemática, pois a construção de barragens com o propósito de uso não consuntivo, como a geração de energia, tem implicação direta no regime de vazões com diversos reflexos: (i) nos processos de erosão e sedimentação, (ii) no aumento da salinidade do estuário, (iii) no processo de renovação das várzeas, (iv) e na redução da biodiversidade, por exemplo. Esses fatores contribuem para alterar o ecossistema local, prejudicando não somente as condições ambientais, mas também as condições socioeconômicas e culturais das comunidades, colocando em risco o modo de vida tradicional da população ribeirinha.

Portanto, é fundamental realizar uma avaliação criteriosa dos impactos dos reservatórios utilizados para regularização de vazão em Usinas Hidrelétricas, levando em consideração os aspectos ambientais, econômicos e culturais. Isso permitirá uma visão sistêmica do processo, assegurando uma gestão eficiente dos recursos hídricos.

2. JUSTIFICATIVA

Os problemas ligados à disponibilidade hídrica no Brasil são decorrentes da combinação de diversos fatores, tais como o crescimento urbano acelerado e desordenado, das demandas urbanas de abastecimento, das demandas agro de irrigação e dessedentação de animais, pela degradação da qualidade dos corpos hídricos, tendo-se a necessidade de estabelecer o controle sobre estes usos (BRANCO, 2006).

A região do semiárido brasileiro possui a menor disponibilidade dos recursos hídricos do país, próximo a 3%, o que torna a água da chuva com média de 400 a 800 mm anuais a principal fonte de abastecimento para a região (ASAS, 2019). Esse fator não corresponde às necessidades reais do semiárido, já que essa região brasileira ocupa no total 12% do território nacional e abriga cerca de 28 milhões de habitantes entre zonas urbanas (62%) e rurais (38%), distribuídos em 1.477 municípios acordo com último censo demográfico realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas (IBGE). Tal situação implica na escassez hídrica da região, especialmente nos períodos de estiagem.

A água de boa qualidade é essencial para a saúde da população. O sexto Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS6) da Organização das Nações Unidas (ONU) possui como uma de suas metas o acesso universal e equitativo à água potável e segura para todos (IPEA, 2019). É necessário, portanto, garantir a oferta de água de boa qualidade para a população conjuntamente à preservação das funções hidrológicas e biológicas dos ecossistemas, respeitando os limites da natureza (AGENDA 21, 1992).

Peixoto e Mauad (2003) destacam a importância de estudos que visem o uso sustentável dos recursos hídricos nas bacias hidrográficas em função da variabilidade temporal, espacial, quantitativa e qualitativa, tanto na demanda quanto na disponibilidade de água.

À luz do exposto, esse trabalho tem como objetivo avaliar as mudanças em relação ao fluxo de água do Rio São Francisco, especialmente nos municípios localizados à

jusante da Usina Hidrelétrica de Sobradinho. Este estudo pretende avaliar os impactos da construção e operação de reservatórios e fornecer informações importantes para a gestão sustentável dos recursos hídricos e desenvolvimento urbano na região.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar os impactos no regime de vazões do Rio São Francisco decorrentes da construção e operação da Usina Hidrelétrica de Sobradinho (BA).

3.2. Objetivos Específicos

A esse objetivo geral, são associados os seguintes objetivos específicos:

- avaliar o comportamento das vazões antes e após a implementação do barramento da usina;
- realizar uma avaliação do perfil transversal do Rio São Francisco após a implementação da usina; e
- avaliar os impactos da regularização no meio urbano após a implementação da usina;

3.3 Estrutura do Trabalho

Para a análise e garantia de que esses objetivos sejam atingidos, o presente projeto será estruturado, conforme descrito a seguir.

➤ **Capítulos 1, 2 e 3.** Introdução, Justificativa e Objetivos: apresentam as motivações e justificativas para a realização do trabalho, assim como os objetivos do estudo.

➤ **Capítulo 4.** Revisão Bibliográfica: apresenta o levantamento bibliográfico condizente com a temática do trabalho, abrangendo aspectos do regime de vazões em rios.

➤ **Capítulo 5.** Metodologia: apresenta os materiais e métodos empregados na realização deste trabalho.

➤ **Capítulo 6.** Resultados e Discussão: apresenta os resultados à luz da metodologia proposta.

➤ **Capítulo 7.** Conclusões: apresenta as principais conclusões deste trabalho, respondendo aos objetivos propostos e oferecendo sugestões para estudos futuros.

➤ **Capítulo 8.** Referências: apresenta as referências que contribuíram para a realização deste trabalho.

4. REFERENCIAL TEÓRICO

Vislumbrando o desenvolvimento metodológico deste trabalho, faz-se necessário a contextualização quanto ao panorama hídrico brasileiro, ao sistema de monitoramento de dados de vazão e perfil transversal, às curvas de descarga e permanência, ao regime de vazões, às variações climáticas e por fim às barragens de regularização de vazão.

4.1. Disponibilidade Hídrica

A disponibilidade hídrica se refere à quantidade de água disponível para usos diversos, como o humano e industrial, considerando a importância da manutenção e sobrevivência dos ecossistemas aquáticos (CRUZ; TUCCI, 2008). Assim, a disponibilidade hídrica está relacionada ao balanço entre o potencial de produção de água de uma região e a quantidade demandada pelos diversos usos consuntivos (CBH-LN, 2014).

Nesse sentido, embora os recursos hídricos se caracterizem como um bem essencial ao desenvolvimento econômico e social de uma região, a sua disponibilidade é limitada (TUCCI; HESPANHOL; NETTO, 2001) e, por isso, precisa ser corretamente gerenciada.

De acordo com o site da WWF Brasil (2022), 97% da disponibilidade hídrica mundial corresponde à água salgada presente nos mares e oceanos, restando apenas 3% de água doce. Vale ainda, ressaltar que aproximadamente 2,5% da água doce do planeta encontra-se em regiões polares ou subterrâneas (aquíferos), sendo somente 0,007% dessa água superficial, presente em rios e lagos (FERREIRA; SILVA; PINHEIRO, 2008).

O Brasil está entre os países de maior reserva de água doce, possuindo 13,8% do deflúvio médio mundial (BRITO; SILVA; PORTO, 2007). Em contrapartida, aproximadamente 35 milhões de brasileiros carecem de acesso à água de qualidade (SILVA *et al.*, 2021), sendo uma das razões para essa carência a ideia de abundância

dos recursos hídricos, o que acabou gerando uma cultura de uso abusivo e desperdício desse recurso (BARROS; BARROS, 2009).

No que se refere à quantificação dos recursos hídricos, a disponibilidade hídrica pode ser mensurada por meio da análise de vazões mínimas de uma bacia hidrográfica, observadas em períodos de estiagem, demonstrando o potencial natural para o abastecimento urbano, uso industrial, irrigação, navegação, geração de energia elétrica e lançamento de efluentes (RODRIGUEZ, 2004).

Nesse contexto, a Resolução nº 32/2003 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), divide o país em doze regiões hidrográficas, com características naturais, sociais e econômicas similares, visando uma gestão mais eficiente dos recursos hídricos, sendo elas: Amazônica, Tocantins-Araguaia, Atlântico Nordeste Ocidental, Atlântico Nordeste Oriental, Parnaíba, São Francisco, Atlântico Leste, Atlântico Sudeste, Atlântico Sul, Paraná, Paraguai e Uruguai. Na Figura 1, foi detalhada a espacialização das regiões hidrográficas no território brasileiro.



Figura 1 - Divisão das Regiões Hidrográficas brasileiras.
Fonte: elaborado pela autora (2023).

Segundo Rodrigues e Batistela (2013), embora o Brasil seja um país privilegiado em termos de disponibilidade hídrica, a distribuição dos recursos hídricos não é uniforme, considerando, por exemplo, que a região hidrográfica Amazônica, habitada por apenas 5% da população, detém 74% dos recursos hídricos superficiais. A vazão média desta região é aproximadamente três vezes maior que a soma das vazões das demais regiões hidrográficas.

Na Tabela 1 foram relacionadas informações das regiões hidrográficas brasileiras, principalmente no que se refere à área, população e disponibilidade de recursos hídricos no ano de 2005, evidenciando o desequilíbrio entre a distribuição da população e a disponibilidade hídrica de cada região.

Tabela 1 – Panorama da Disponibilidade Recursos Hídricos nas Bacias Hidrográficas Brasileiras no ano de 2005

Região Hidrográfica	Área		População				Recursos Hídricos			
	10³	Km²	%	10⁶ hab.	%	Densidade (hab/km²)	Vazão média (m³/s)	Produção (km³/ano)	%	m³/hab./ano
Amazônica	3.869,9		45	8	5	2,1	131,947	4.156	74	519.541
Tocantins-Araguaia	921,9		11	7	4	7,6	13,624	429	8	61.308
Atlântico NE	274,3		3	5	3	18,2	2,683	85	1	16.903
Ocidental	333,1		4	4	2	12,0	763	24	0,4	6.009
Parnaíba	286,8		3	21	12	73,2	779	25	0,4	1.169
Atlântico NE Oriental	638,6		7	13	8	20,4	2.850	90	2	6.906
São Francisco	388,2		5	14	8	36,1	1.492	47	0,8	3.357
Atlântico Leste	214,6		3	25	15	116,5	3.179	100	2	4.006
Atlântico Sudeste	187,5		2	12	7	64,0	4.174	131	2	10.957
Atlântico Sul	174,5		2	4	2	22,9	4.121	130	2	32.453
Uruguai	879,9		10	55	32	62,5	11.453	361	6	6.559
Paraná	363,4		4	2	1	5,5	2.368	75	1,3	37.296
Paraguai										
Total Brasil	8.532,8		100	170	100	19,9	179.433	5.652	100	33.248

Fonte: Rodrigues e Batistela (2013).

Ainda nesse contexto, a região do nordeste brasileiro possui apenas 3% da água doce existente no país, estando 63% desta localizada na bacia hidrográfica do Rio São Francisco, na região do semiárido brasileiro. A principal característica desta região é a irregularidade do regime de precipitação, tanto no tempo, como no espaço, apresentando chuvas que se concentram em até quatro meses em diversos municípios. Outrossim, a região possui uma elevada evapotranspiração, intervindo ainda mais na produção hídrica da região (BRITO; SILVA; PORTO, 2007).

Verifica-se, dessa forma, que os fenômenos hidrológicos que influenciam os fluxos dos rios são temporal e espacialmente estocásticos (ASFORA; CIRILO, 2005). Em consequência, a variabilidade temporal das chuvas resulta em variações das vazões nos rios, caracterizando situações de *déficit* hídrico natural ou de excesso de vazão. A fim de mitigar esses problemas, recorre-se à regularização das vazões (BARBOSA JÚNIOR, 2022).

A regularização de vazões é uma forma eficiente de promover o desenvolvimento sustentável e otimizar a gestão dos recursos hídricos (LI; HUANG; NIE, 2010; NUNES; PRUSKI, 2015). Barbosa Júnior (2022) explica que a prática de regularização de vazões baseia-se em reduzir a variabilidade temporal da vazão, permitindo um melhor aproveitamento dos recursos hídricos. Para alcançar esse objetivo faz-se necessária a construção de barragens em seções bem determinadas dos cursos de água naturais, a fim de promover o represamento (PERILLO JÚNIOR; VILELA; NETO, 2012).

Em suma, a regularização de vazão consiste no armazenamento de água em reservatórios durante o período de chuvas, para utilizá-la gradualmente durante o período de seca, complementando as necessidades hídricas de uma região, e reduzindo os riscos de inundações em áreas situadas a jusante (BARBOSA JÚNIOR, 2022).

Ao utilizar a regularização de vazões, é possível aumentar a disponibilidade hídrica, o que, por sua vez, permite uma maior concessão de outorgas para usos múltiplos da água, atendendo a um maior número de pessoas (NUNES; PRUSKI, 2015).

No que se refere à outorga de direito de uso da água, devido à variação climatológica das regiões hidrográficas brasileiras, e por não haver uma normativa nacional unificada, cada estado adota o seu próprio parâmetro no estabelecimento das vazões outorgáveis. Na Tabela 2 foram apresentados alguns exemplos de vazões adotadas como parâmetro para concessão de outorga, onde $Q_{90\%}$ e $Q_{95\%}$ são as vazões mínimas com permanência de 90% e 95% no tempo e $Q_{7,10}$ é a vazão mínima com permanência de 7 dias consecutivos e 10 anos de tempo de retorno.

Tabela 2 – Critérios considerados

Unidade Federativa	Vazão Outorgável
Bahia	80% da $Q_{90\%}$
Pernambuco	90% da $Q_{90\%}$
Minas Gerais	30% da $Q_{7,10}$
Sergipe	80% da $Q_{95\%}$

Fonte: Adaptado de Asfora e Cirilo (2005).

Vale ressaltar que, quando se adota a regularização de vazão, a garantia de suprimento de água aproxima-se do potencial médio da bacia, e a vazão de referência para outorga passa a ser a vazão de média de longa duração (RIBEIRO, 2016).

À luz de exposto e para garantir uma gestão eficiente e sustentável dos recursos hídricos, é essencial o monitoramento contínuo da disponibilidade hídrica, visto que o mesmo permite avaliar a qualidade e a quantidade da água disponível em uma determinada região, bem como identificar as possíveis ameaças. Complementarmente, o monitoramento é uma ferramenta fundamental para tomada de decisões, possibilitando controlar os valores de referência de outorgas, o regime e a regularização de vazão, garantindo o uso eficiente e racional da água.

4.2. Monitoramento das Agências de Regulamentação e Empresas

Os problemas de disponibilidade hídrica no Brasil decorrem da combinação do crescimento exagerado, de demandas urbanas de abastecimento, de irrigação e pela degradação da qualidade dos corpos hídricos, tornando necessário estabelecer o controle sobre estes usos (BRANCO, 2006). Para alcançar o desenvolvimento sustentável dos recursos hídricos e estabelecer um controle sobre esses usos, a Política Nacional de Recursos Hídricos, instituída na Lei 9.433/97, possui entre seus fundamentos o uso múltiplo dos recursos hídricos, caracterizando a água como recurso finito e vulnerável e de elevado valor econômico (BRASIL, 1997).

A Lei Federal n.º 9.433/97 trata também de seis instrumentos de gestão dos recursos hídricos, entre eles os Planos de Recursos Hídricos, a outorga, a cobrança pelo uso da água, o enquadramento de corpos de água em classes e o Sistema de Informações sobre os Recursos Hídricos (BRASIL, 1997). Esses instrumentos incentivam o uso racional da água, além de possibilitar a recuperação das bacias hidrográficas com a obtenção de recursos financeiros.

Ainda no contexto da Política Nacional de Recursos Hídricos, tem-se a instituição de órgãos reguladores para o setor de recursos hídricos, destacando-se: o Conselho Nacional de Recursos Hídricos, os Conselhos de Recursos Hídricos dos Estados e do Distrito Federal, os Comitês de Bacia Hidrográfica e a ANA (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico).

O principal instrumento utilizado pelos órgãos reguladores para tomada de decisões é o Sistema Nacional de Informações dos Recursos Hídricos (SNIRH), sob responsabilidade da ANA. O SNIRH reúne dados de níveis fluviais, vazões, chuvas, climatologia, qualidade da água e sedimentos, permitindo o monitoramento da disponibilidade e qualidade da água em cada região de forma unificada e descentralizada, garantindo o acesso a dados e informações à toda a sociedade (BRASIL, 1997).

Segundo WMO (2008) os dados obtidos a partir do monitoramento contínuo são fundamentais, pois poderão servir como auxílio para a elaboração de estudos

científicos e de projetos de engenharia. Esses instrumentos delimitaram usos prioritários e ações para a conservação do meio ambiente, visto que os registros de vazão são os dados básicos usados como fontes confiáveis para o conhecimento da variabilidade espaço-temporal do fluxo.

O banco de dados do SNIRH contém todas as informações coletadas pela Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN), disponibilizadas pelo portal HidroWeb. Esse portal reúne dados de 4.641 pontos de monitoramento no país, divididos em estações que monitoram parâmetros dos rios (1.874) e outros que monitoram dados de chuvas (2.767) (ANA, 2023). A distribuição das estações de monitoramento no país é apresentada na Figura 2, na qual pode-se perceber também que a localização das estações de monitoramento está concentrada em áreas de maior densidade populacional, próximas ao litoral brasileiro.



Figura 2 - Distribuição das Estações da RHN.
Fonte: elaborado pela autora (2023).

As estações são operadas por entidades parceiras ou contratadas pela ANA, sendo elas: o Serviço Geológico do Brasil (SGB) antiga Companhia de Pesquisa de

Recursos Minerais (CPRM), a Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI/SC), o Departamento de Águas e Energia Elétrica de São Paulo (DAEE/SP), o Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM/MG), o Instituto das Águas do Paraná (AGUASPARANÁ) e as empresas contratadas COHIDRO, CONSTRUFAM e UFC. Além das estações sob responsabilidade da ANA, também são integrantes as estações de monitoramento da qualidade da água, o Qualiágua (ANA, 2023).

O monitoramento de corpos hídricos é realizado a partir de estações fluviométricas, que contemplam informações de medição do nível do rio – cota (m), a medição de descarga líquida - Q (m^3/s), a medição de descarga sólida – Q_s (ton/dia), o levantamento do perfil transversal da seção de medição (m) e a medição dos parâmetros de qualidade da água – QA (PEREIRA *et al.*, 2020).

4.2.1. Medição de Vazão

Entende-se a vazão como o volume de água que passa em uma determinada seção do rio por uma dada unidade de tempo, expressa em m^3/s , conforme o sistema internacional (SI). A vazão é geralmente determinada pelas variáveis profundidade, largura (área da seção do rio) e a velocidade do fluxo de água (CARVALHO, 2008). Evidencia-se, assim, a correlação entre a medição de vazão e a medição de velocidade.

A medição da vazão é um processo empírico utilizado para determinar a vazão de um curso de água (SILVA; COSTA, 2011). Os métodos de medição de vazão podem ser realizados de forma direta, ou de forma indireta, baseado em fórmulas hidráulicas.

A escolha da técnica de medição de vazão dependerá das características físicas dos rios, disposição de equipamentos, da precisão desejada, do custo, da experiência do operador, entre outros fatores. Dentre os métodos e técnicas existentes para a medição de vazão em rios, destacam-se:

- **Molinete Hidrométrico**

O molinete hidrométrico é o método mais difundido devido à sua facilidade de manuseio e custo-benefício (CARVALHO, 2008). Conhecido também como correntômetro de hélice, é um equipamento que contém um velocímetro com forma de torpedo (Figura 3) cujo funcionamento consiste na conversão do movimento de translação do fluxo em um movimento de rotação da hélice do molinete.

A velocidade de fluxo medida pelo molinete é determinada com o auxílio de um contador de giros, contabilizando os giros realizados pela hélice em um determinado intervalo de tempo. A quantidade de giros é inserida na “equação do molinete” fornecida por cada fabricante, extraíndo-se o valor da velocidade (RIOS *et al.*, 2011).



Figura 3 - Molinete Fluviométrico Universal Marca Medir.
Fonte: APARELHOS MEDIR (2023).

- **Flutuadores**

Os flutuadores ou partículas flutuantes remetem a uma técnica simples de estimativa de velocidade, por meio de objetos flutuantes (RIOS *et al.*, 2011). Alguns exemplos de flutuadores podem ser visualizados na Figura 4.



Figura 4 - Exemplo de flutuadores.
Fonte: RIOS *et al.*(2011)

A medição é baseada no acompanhamento do deslocamento dos flutuadores ao longo da corrente de fluido a um determinado intervalo de tempo. Multiplica-se, então, a velocidade média pela área da seção transversal, por onde está ocorrendo o escoamento, e obtêm-se a vazão (RIOS *et al.*, 2011). A velocidade superficial obtida pelos flutuadores é na maioria das vezes superior à velocidade média do escoamento (DELMEE, 2003), se considerada toda a profundidade do trecho.

- **Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP)**

O ADCP - *Acoustic Doppler Current Profiler* ou Correntômetro Acústico de Efeito Doppler é um instrumento que mede a velocidade do fluxo em perfis verticais, utilizando técnicas de sensoriamento remoto. Na Figura 5 é disponibilizada uma ilustração de como é realizada a medição via ADCP.

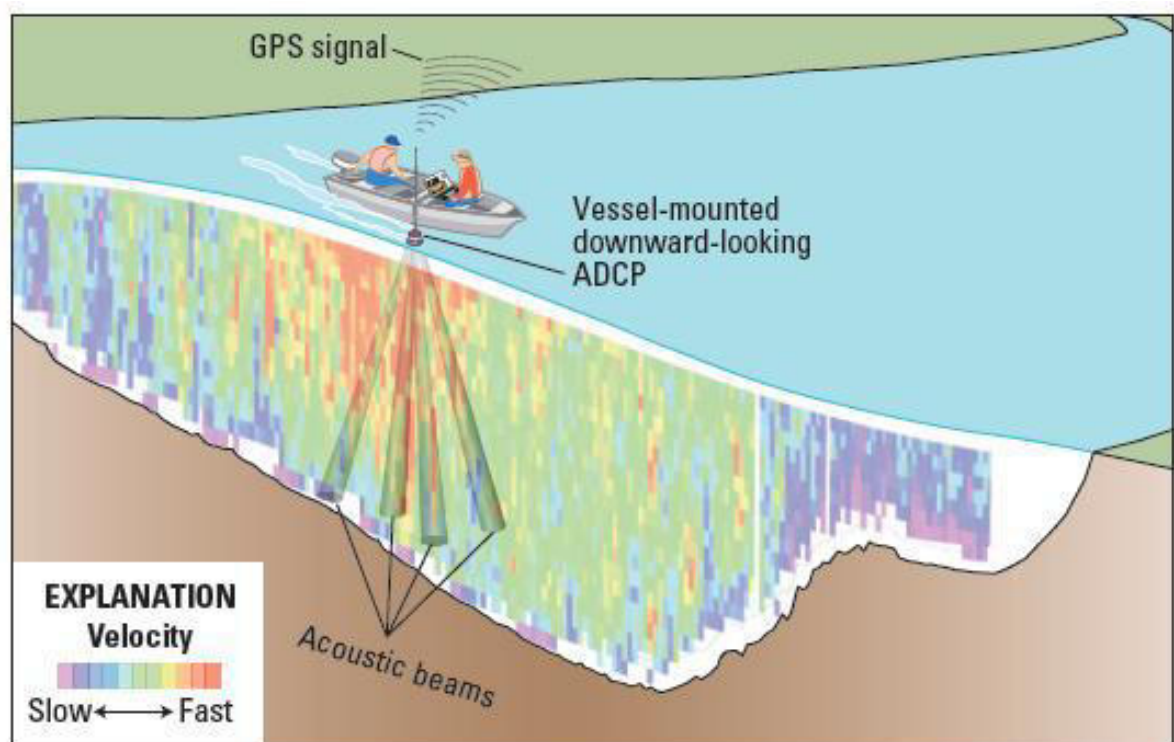


Figura 5 - Medição ADCP.
Fonte: Gotvald e Öberg (2008).

O funcionamento do ADCP consiste na emissão de pulsos acústicos em uma frequência de 600kHz, a uma velocidade de 1400 a 1570 m/s, que ao ser refletida por partículas em suspensão na água e no leito do rio sofre alteração em seu comprimento de onda (modificando a frequência). O sinal de retorno é utilizado para estimar a velocidade e o deslocamento relativo em relação à fonte (CARVALHO, 2008).

A velocidade da água medida pelo equipamento quando a embarcação está em movimento é denominada velocidade relativa. Considerando que o equipamento também está em movimento, a velocidade de movimentação da embarcação irá interferir na velocidade registrada. Logo, se o barco se movimenta mais rápido, a

velocidade relativa da água também irá aumentar. Sabendo da real velocidade do barco e seu deslocamento, é possível remover essa diferença do valor final (GAMARO, 2012).

4.2.2. Perfil Transversal da Seção de Medição

A batimetria do perfil transversal consiste em um levantamento do relevo da “seção molhada”, ou seja, a parte submersa da seção transversal (GUIMARÃES, 2014). O levantamento batimétrico pode ser realizado “a vau” por uma sonda rígida graduada, denominada sonda batimétrica, aplicável em rios pequenos, com profundidades inferiores a 1 m e velocidades abaixo de 1 m/s. Complementarmente, o levantamento também pode ser realizado por ecobatímetros ligados a embarcações, cujo funcionamento consiste na emissão de ondas sonoras, e o tempo de resposta permite a detecção da profundidade. Uma embarcação realizando um levantamento batimétrico é representada na Figura 6.

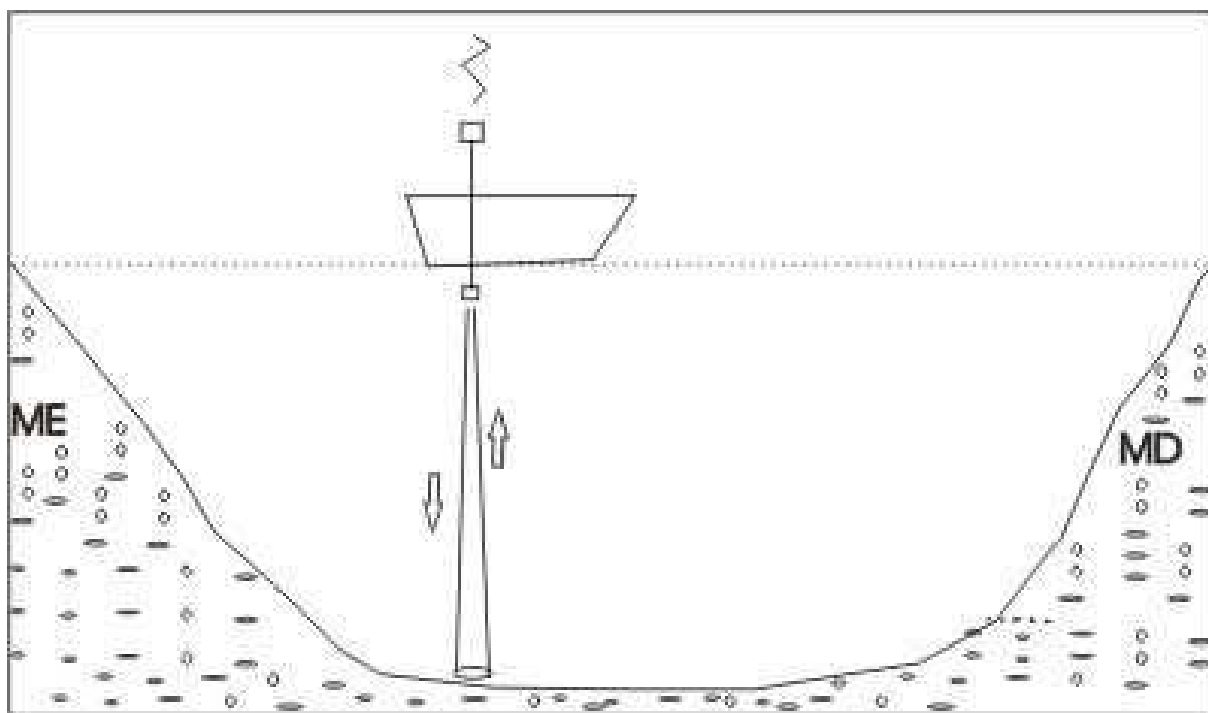


Figura 6 - Funcionamento Ecossonda.
Fonte: Carvalho(2008).

Os processos mais utilizados no Brasil são por meio dos guinchos hidrométricos, também realizados com o auxílio de embarcações, sendo o posicionamento do guincho nas verticais feito com um cabo de aço graduado ou por métodos indiretos

(sextante, triangulação ou distanciômetro). A profundidade máxima medida com o guincho dependerá da velocidade da corrente (GUIMARÃES, 2014).

A seção transversal permite acompanhar a movimentação e a variação do leito fluvial ao longo do tempo, identificando os processos de erosão, desgaste do material sedimentar e de assoreamento e deposição do material sedimentar. A variação do leito do rio também pode impactar a relação cota-descarga, podendo justificar a adoção de mais de uma curva-chave para o cálculo de vazões observadas em uma região (PIMENTEL, 2015).

4.2.3. Curva de Descarga (Curva-Chave)

A curva-chave é a curva de nível de água (cota), em relação à vazão, obtida a partir do resultado das medições de descarga. As curvas-chave são geralmente representadas de forma gráfica, sendo a equação matemática da forma exponencial (Equação 1), a que tem maior identidade física (PIMENTEL, 2015).

$$Q = a(h - h_o)^b \quad \text{(Equação 1)}$$

Onde:

Q = Vazão, m^3s^{-1}

h = Cota fluviométrica observada (leitura da régua), m

h_o = Cota equivalente da vazão nula, m

a e b = Coeficiente de ajustes, adimensionais.

Guimarães (2014) destaca que as curvas-chave são de grande importância, pois fornecem informações utilizadas na elaboração de estudos hidrológicos e orientam diversos processos de tomada de decisão, como a análise de processos de outorga, definições sobre medidas estruturais e não estruturais associadas à eventos críticos (cheias ou estiagens), abastecimento público, lançamento de efluentes em corpos receptores, entre outros.

4.2.4. Curva de Permanência

A curva de permanência ou curva de duração de vazões é a curva acumulativa de frequência temporal contínua dos valores de vazões. A partir da análise de frequência, extrai-se a probabilidade de um determinado evento ser igualado ou ultrapassado (PIMENTEL, 2015).

Os eventos são representados de forma gráfica, sendo plotados em ordem decrescente. Dessa forma, permite-se visualizar a potencialidade natural do rio, destacando a vazão mínima e o grau de permanência de qualquer valor de vazão (PINTO *et al.*, 1976). O valor da posição de plotagem é dado pela (Equação 2).

$$P = \left(\frac{n_{ordem}}{n} \right) \times 100 \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

P = probabilidade de ocorrência

n_{ordem} = posição do elemento na ordem decrescente de classificação

n = quantidade de elementos da amostra

As curvas podem ser construídas para vazões médias diárias, mensais e anuais. Contudo, as curvas de vazões médias anuais podem distinguir significativamente das vazões médias mensais ou diárias, pois quanto maior for o intervalo unitário de tempo utilizado, menor será a gama de variação ao longo do eixo das ordenadas e, em consequência, da própria natureza do valor médio. Em vista disso, Pinto *et al.* (1976) destaca a utilização preferencial da curva para vazões médias diárias, de forma a evitar esse efeito amortecedor da média de períodos mais extensos.

Ao se caracterizar as frequências de ocorrência da variável hidrológica é possível avaliar a disponibilidade hídrica frente às demandas. Como alternativa ao emprego das vazões mínimas, os valores de permanência de 90% a 95% são constantemente utilizados nas avaliações de atendimento aos padrões ambientais do corpo d'água receptor, alocação de efluentes e para concessão de outorgas de captação de água (BARBOSA JÚNIOR, 2022).

Ainda de acordo com Barbosa Júnior (2022), a forma da curva de permanência é um indicativo das características do curso d'água. Por exemplo, uma curva mais achatada indica a presença de grandes armazenamentos naturais a montante da estação fluviométrica, e uma curva com forte declive indica a ausência de armazenamentos na calha do rio. Neste sentido, as curvas de permanência utilizadas nos estudos de disponibilidade hídrica estão diretamente relacionadas às alterações do regime de vazão em um curso d'água.

4.3. Regime de Vazões

O conhecimento do regime de vazões dos rios constitui uma informação primordial na busca de alternativas para o planejamento do uso dos recursos hídricos e para o planejamento ambiental no âmbito da bacia hidrográfica (ROCHA; ANDRADE, 2016).

O regime de vazões pode ser definido como a variação da vazão de um curso de água ao longo do tempo, ou seja, o regime de vazões representa as variações de vazões ao longo de um período de observação, na sequência cronológica de ocorrência. A forma mais usual de representar o regime de vazões é de maneira gráfica, por meio dos hidrogramas, também conhecidos como fluviogramas.

Pinto *et al.* (1976) indica que os fluviogramas podem ser construídos por uma linha contínua, indicando a variação do valor da vazão ao longo do tempo, ou por traços horizontais descontínuos, correspondentes às vazões médias de um certo intervalo de tempo unitário. A representação gráfica do regime de vazões, fluviograma/hidrograma, pode ser visualizada na Figura 7.

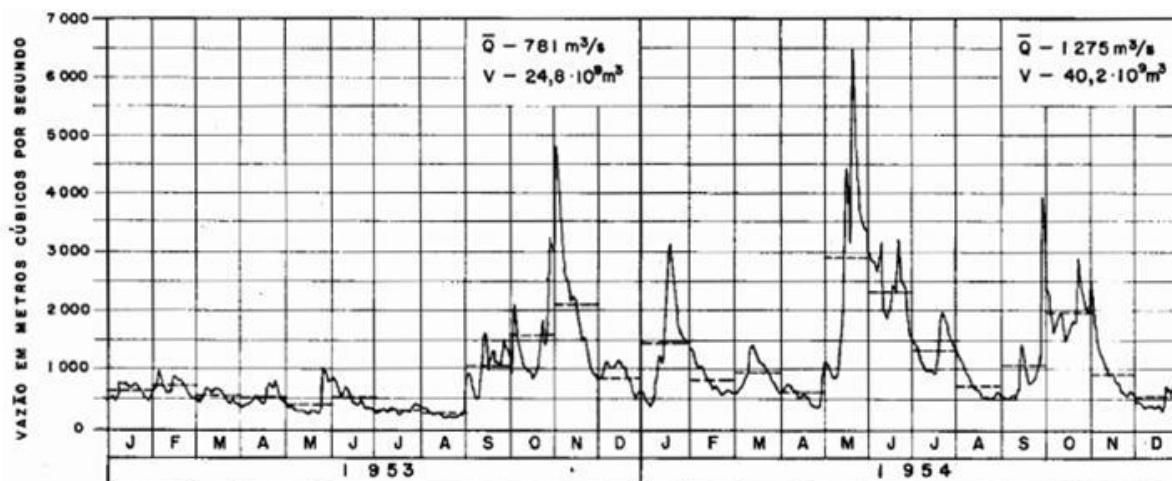


Figura 7 - Fluviograma das vazões do Rio Iguaçu em Salto Osório.
Fonte: Pinto *et al.* (1976)

Além do regime de vazões, o hidrograma é utilizado para a análise de diversas questões relacionadas à gestão de recursos hídricos, como a identificação de períodos críticos de escassez de água, a avaliação do impacto de ações antrópicas na hidrologia da bacia, a previsão de enchentes e a definição de políticas de uso dos recursos hídricos (PINTO *et al.*, 1976).

As alterações no regime de vazões podem ser causadas por diversos fatores, incluindo mudanças climáticas, interferências antrópicas, como a construção de barragens, o desmatamento e a urbanização, além de outros eventos extremos, como secas e enchentes (TUNDISI; MATSUMURA -TUNDISI, 2011).

O século XX foi marcado por diversas construções de barragens em todo o mundo, modificando o regime hidrológico e causando impactos significativos sobre a biodiversidade (COLLISCHONN, 2005). Sendo assim, as barragens de regularização de vazão alteram o comportamento das vazões nos cursos d'água, pois modificam o suprimento de água a jusante, tendendo a aumentar a vazão mínima disponível, aproximando-a da vazão média (RIBEIRO, 2016).

Em estruturas em que a operação é realizada por armazenamento de água em seus reservatórios, onde as vazões afluentes são superiores às vazões defluentes, são observados a diminuição das vazões máximas e elevação das vazões mínimas durante o processo de regularização. O comportamento dessas vazões em reservatórios é exemplificado por Pedrosa (2023) na Figura 8.

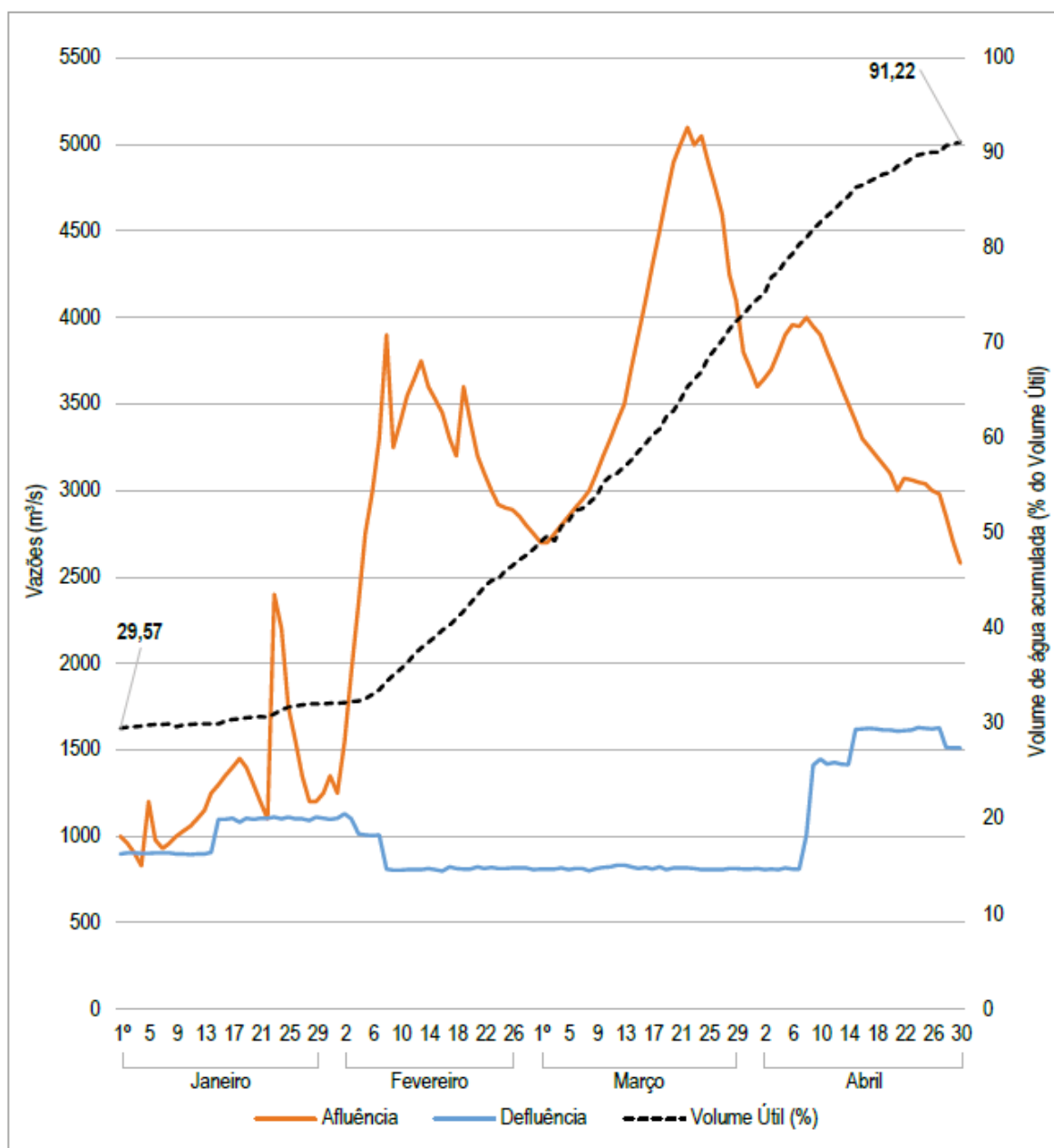


Figura 8 – Vazões afluentes e defluentes no reservatório de Sobradinho no primeiro quadrimestre de 2020.
Fonte: Pedrosa (2023).

A análise do comportamento de regularização em estruturas com reservatório foi abordada no estudo de Martins *et al.* (2011), sobre o impacto da construção da usina hidrelétrica de Sobradinho no regime de vazões. No estudo a análise de vazão da estação Pão de Açúcar (Gráfico B da Figura 9) apresentou regularização típica da literatura, com redução das vazões máximas e aumento das vazões mínimas. Entretanto, para as estações Piranhas, Traipu e Propriá (Gráficos A C e D da Figura

9). Ainda segundo os autores essas reduções foram atribuídas à curta série histórica de dados utilizada no estudo.

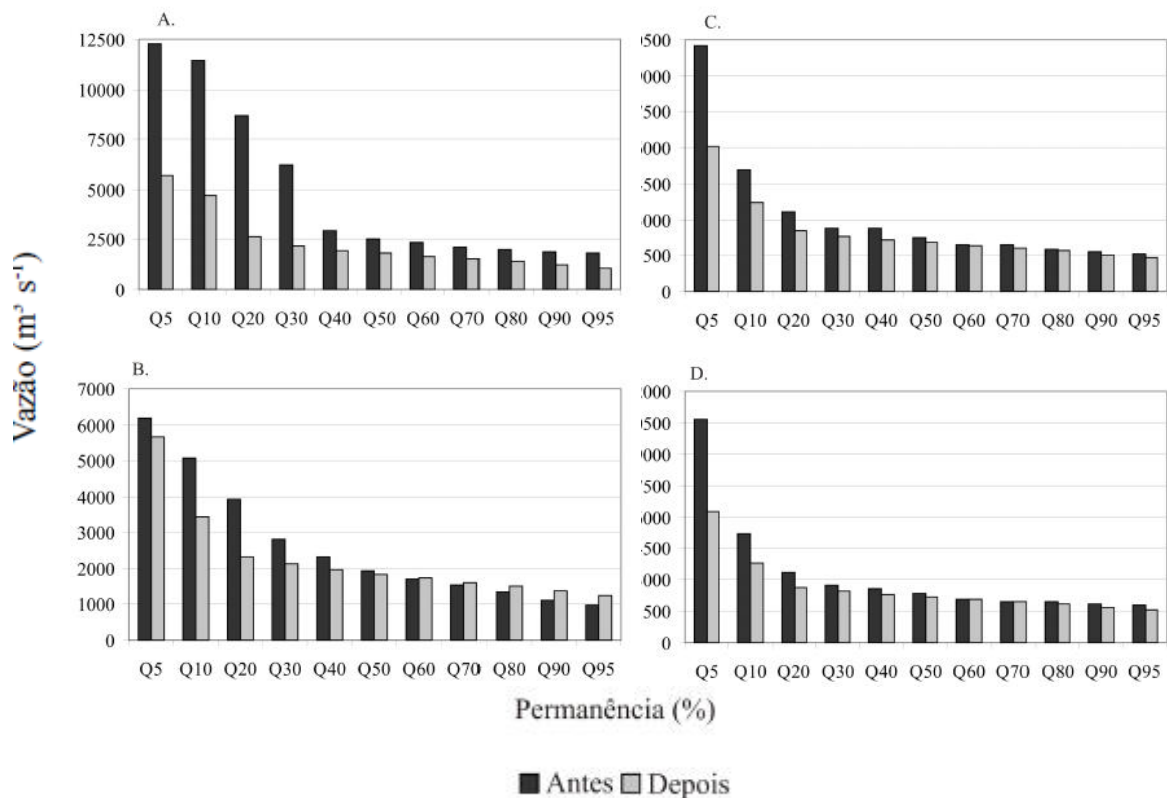


Figura 9 – Permanência de vazões para as estações de Piranhas (A), Pão de Açúcar (B), Traipu (C) e Propriá (D).

Fonte: MARTINS *et al.* (2011).

Martins *et al.* (2011) indicam que os métodos utilizados para caracterizar o regime dos rios não consideram o aspecto ambiental, presumindo que a manutenção de um valor de referência calculado com base em alguma estatística da série histórica possa trazer benefícios ao ecossistema. Apesar disso, esses métodos têm a vantagem de requerer uma quantidade limitada de informações para sua aplicação, geralmente apenas a série histórica de vazões, como destacado por Collischonn (2006).

Dessa maneira, a qualidade do ecossistema em um rio está intimamente ligada ao regime de vazões, que inclui a magnitude das vazões mínimas e máximas, o tempo de duração das estiagens, a frequência e época de ocorrência das cheias, entre outros fatores (POFF *et al.*, 1997).

A variabilidade do regime de vazões é influenciada por diversos elementos que caracterizam a bacia hidrográfica, como litologia, relevo, solos e cobertura vegetal, além de fatores climáticos como precipitação, radiação solar e evaporação (TUCCI, 2002).

4.4. Variações Climatológicas no Brasil

O Brasil é um país tropical que possui uma grande diversidade climática, com áreas de clima úmido, semiárido e equatorial (NOBRE *et al.*, 2016). A variabilidade climática no país é sazonal e tem impacto na disponibilidade hídrica, o que a torna um fator crucial para a sustentabilidade das atividades socioeconômicas (TUCCI; HESPANHOL; NETTO, 2001)

Devido ao clima tropical dominante, os rios brasileiros são predominantemente alimentados pelas águas das chuvas, sendo que as cheias geralmente ocorrem durante o verão (entre outubro e março). No entanto, no Nordeste, por exemplo, as cheias ocorrem no outono e no inverno (RODRIGUES; BATISTELA, 2013).

Cada região do país possui um padrão de chuvas diferente. No Sul, a quantidade de chuva varia pouco ao longo do ano, sem períodos distintos de chuva ou seca. No Norte, mesmo com chuvas constantes durante todo o ano, a época mais chuvosa é entre março e maio, enquanto a época menos chuvosa é entre setembro e novembro. No Nordeste, a época mais chuvosa ocorre entre maio e julho, enquanto a época seca é entre setembro e novembro. Já nas regiões Sudeste e Centro-oeste, as chuvas são mais concentradas entre outubro e março, e muito escassas durante o inverno (NAGHETTINI, 2012).

A variabilidade de precipitação anual do país é apresentada na Figura 10, na qual se observa que, com exceção do Nordeste, as precipitações médias anuais são superiores a 1.000 mm. Destaca-se a precipitação da região Amazônica, com valores superiores a 2.000 mm, enquanto, no Semiárido do Nordeste, onde se localizam as bacias do Atlântico Nordeste Oriental, Parnaíba, São Francisco e Atlântico Leste, a precipitação média anual alcança valores inferiores a 500 mm.

Rodrigues e Batistela (2013) explicam que os rios na região hidrográfica da Amazônia são os mais beneficiados pela uniformidade das chuvas, enquanto os rios da região Sul, apesar de não apresentarem uma vazão tão alta, ainda possuem uma distribuição pluviométrica razoável. Por outro lado, os rios da região do Semiárido, no Nordeste, podem desaparecer durante a estação seca, conhecidos como rios temporários ou intermitentes.

A acentuada variabilidade da pluviometria durante o ano está associada a variações de padrões de Temperatura da Superfície do Mar (TSM), sobre os oceanos tropicais, os quais alteram a posição e a intensidade da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) sobre o Oceano Atlântico. Complementarmente, estas variações influenciam as anomalias de temperatura observadas no Oceano Pacífico, que ao longo dos anos podem se manifestar como *La Niña* e/ou *El Niño* (MOURA, 2021).

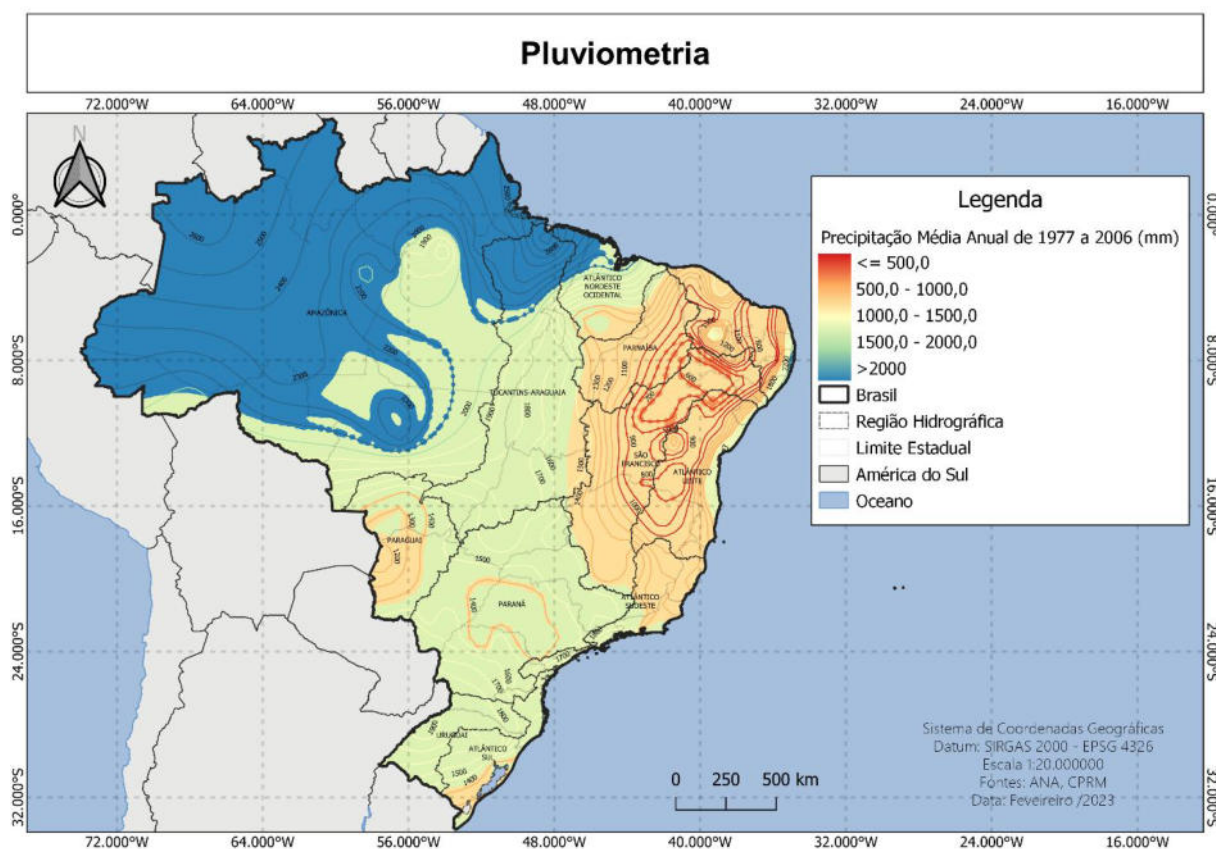


Figura 10 - Precipitação média anual no Brasil de 1977 a 2006.
Fonte: elaborado pela autora (2023).

Liu et al. (2013) explicam que a seca começa com a ausência de chuvas por um período prolongado, mas esse fenômeno se agrava consideravelmente quando há uma elevada perda de água para a atmosfera, processo conhecido como evapotranspiração (CABRAL JÚNIOR; BEZERRA, 2018).

O processo de evapotranspiração desempenha um papel fundamental no ciclo da água, pois é através dele que uma parte da água é devolvida para a atmosfera, permitindo a manutenção do equilíbrio hídrico e climático do planeta. A evapotranspiração está diretamente ligada às condições de precipitação, temperatura e umidade do solo (TUCCI; HESPANHOL; NETTO, 2001).

A temperatura pode ser considerada a característica mais importante do meio aquático, pois além de influenciar o processo evapotranspiração, é um importante fator modificador da qualidade da água (SILVA; GALVÍNCIO; ALMEIDA, 2010). Os aumentos de temperatura diminuem as concentrações de oxigênio dissolvido, gás carbônico, pH, dentre outras propriedades (HAMMER, 1979).

4.5. Impactos da Implementação de Barragens de Regularização de Vazões

Dentre as finalidades da construção de um reservatório de regularização de vazão é possível destacar: (i) armazenamento da água de um rio, com o propósito de guardá-la para usos consuntivos (abastecimento humano, dessedentação animal, irrigação ou uso industrial); (ii) criação de um desnível para geração hidrelétrica, deixando um espaço para o recebimento de uma onda de cheias; e (iii) garantia de navegação (ANA, 2016).

Em termos de geração hidrelétrica, as usinas brasileiras produzem cerca de 57% da energia elétrica do país (BEN, 2022). A geração hidrelétrica é proporcional à queda de água e à vazão do rio. Para garantir boas condições de captação de água, é fundamental a construção de uma barragem e reservatórios, que devem ser operados de forma a respeitar os usos múltiplos de água (BRASIL, 2000).

As barragens de usos múltiplos são projetos fundamentais para países em desenvolvimento, pois as populações recebem benefícios econômicos e domésticos

de um único empreendimento (CIGB, 2008). Em vista disso, a construção de barragens hidrelétricas com a formação do reservatório de regularização atinge múltiplos objetivos, com o uso dos recursos hídricos contemplando as necessidades de abastecimento urbano e rural, a geração de energia, a atenuação de cheias urbanas, o controle de estiagens, o controle de sedimentos e poluição difusa, além de favorecer atividades de recreação, reprodução de peixes e a navegação fluvial.

No entanto, as hidrelétricas com grandes reservatórios de regularização geralmente são vistas como intervenções que geram impactos socioambientais negativos, como a mudança do fluxo natural dos rios, o alagamento de grandes áreas e o deslocamento de comunidades (SOUZA *et al.*, 2010).

As barragens de regularização de vazão, construídas para geração de energia hidrelétrica, causam mudanças nos níveis de água a jusante, pois dependendo da quantidade de energia necessária, a operação do reservatório pode resultar em variações de vazões (SANTOS *et al.*, 2020).

Para Craig (2000) essas variações no regime de vazões implicam em impactos negativos ao ecossistema, uma vez que facilitam a invasão de espécies exóticas, contribuindo para a extinção de espécies nativas. Além disso, esse mesmo autor destaca a perda de fertilidade de solos inundáveis, que dependem dos nutrientes depositados durante os períodos de cheias, a retenção de sedimentos e bloqueio de rotas migratórias.

Nunes (2020) apresenta uma análise abrangente dos impactos causados pela implementação de barragens de regularização de vazão, englobando tanto os aspectos negativos, quanto positivos. Os impactos foram sintetizados na Tabela 3.

Nesse sentido, as barragens de regularização de vazão de Usinas Hidrelétricas (UHE) podem trazer benefícios importantes à sociedade, mas é necessário avaliar cuidadosamente seus impactos negativos e procurar maneiras de mitigá-los. Portanto, um aspecto fundamental da segurança hídrica é encontrar um equilíbrio entre as necessidades humanas de consumo e o desenvolvimento sustentável, visando a

preservação da biodiversidade e dos serviços ecossistêmicos relacionados à água (PEREIRA; RODRIGUEZ, 2022).

Tabela 3 - Principais impactos de barragens Usinas Hidrelétricas.

Impactos da regularização de vazão por barragens de usinas hidrelétricas	
Positivos	Negativos
• Produção de energia renovável e barata, com baixas emissões de gases de efeito estufa; • Regularização das vazões, reduzindo os picos de cheias e elevando as vazões de estiagem; • Capacidade de proteção contra cheias das áreas a jusante; • Adaptação às mudanças climáticas pela capacidade de controlar cheias e armazenar água para períodos de seca; • Garantia de água para abastecimento, irrigação, indústria e demais usos consuntivos; • Viabilização do transporte hidroviário; • Oportunidade de desenvolvimento de atividades turísticas, de recreação, aquicultura e pesca no lago; • Liberação de ondas de cheia podem diluir eventuais concentrações de poluentes; • Possibilidade de exploração de água subterrânea por causa da elevação do nível do lençol freático.	• Alagamento de grandes áreas a montante • Possibilidade de aumento da evaporação do espelho d'água; • Alteração do hidrograma natural; • Alteração no transporte de sedimentos; • Diminuição do aporte de nutrientes a jusante; • Possível comprometimento da reprodução e migração de peixes; • Alteração de habitats de animais; • Redução das vazões a jusante do reservatório; • Redução da temperatura, do oxigênio dissolvido e do material em suspensão nas vazões liberadas; • Redução do teor de oxigênio dissolvido no fundo e nas vazões liberadas (zero em alguns casos); • Aumento dos teores de H₂S e CO₂ no fundo e nas vazões liberadas; • Alteração no microclima; • Alteração da biodiversidade à jusante.

Fonte: adaptado de Nunes (2020).

4.6. Histórico de Barragens de Usinas Hidrelétricas no Brasil

A expansão de barragens no Brasil teve início em 1880, após a seca do Nordeste que durou mais de três anos, e levou a óbito mais de um terço da população do estado do Ceará. As soluções encontradas durante o governo de Dom Pedro II foram a construção de estradas, para acesso ao litoral, e de barragens (açudes) para suprimento de água para consumo humano e irrigação (CBDB, 2011).

A primeira barragem hidrelétrica do Brasil foi a de Ribeirão do Inferno, construída em 1883 no rio Jequitinhonha, em Minas Gerais, com o objetivo de fornecer energia para uma mina de extração de diamantes da região. No ano de 1889, foi inaugurada a primeira usina de grande porte da América do Sul, a Marmelos, localizada no rio Paraibuna, também em Minas Gerais (OLIVEIRA; 2018).

No Nordeste, a produção de hidreletricidade teve início no rio São Francisco. O empreendedor Delmiro Gouveia construiu e inaugurou em 1913 a usina de Angiquinho, aproveitando as águas da cachoeira de Paulo Afonso, para atender a sua fábrica Pedra. Posteriormente, outras nove usinas hidrelétricas foram construídas ao longo do rio a partir da criação da Companhia Hidrelétrica do São Francisco (CHESF), em 1948 (CUNHA, 2015).

Atualmente, o Brasil é um dos principais construtores de barragens do mundo, sendo o segundo maior produtor de energia hidrelétrica, ficando atrás apenas da China (OLIVEIRA, 2018). Segundo o Relatório de Segurança de Barragens (ANA, 2023) o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB), o Brasil possui atualmente 25.943 barragens cadastradas, das quais 1.303 (aproximadamente 5%) são destinadas à geração de energia elétrica com capacidade de mais de 572 bilhões de m³ (89% da reserva de água), 2.846 (aproximadamente 11%) são destinadas à regularização de vazão. Um gráfico com a distribuição dos usos de barragens no Brasil é apresentado na Figura 11.

Barragens Cadastradas no Brasil (2023)

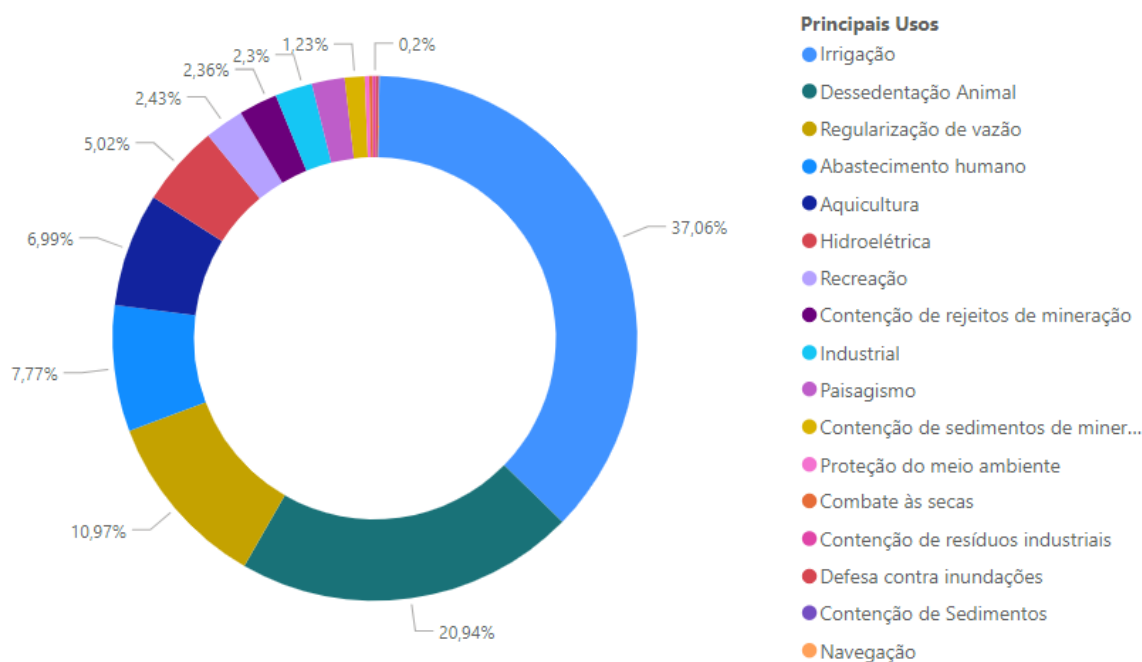


Figura 11 - Gráfico usos de barragens no Brasil.
Fonte: elaborado pela autora (2023).

As regiões hidrográficas do Paraná e do São Francisco destacam-se com seus potenciais hidrelétricos. Essas regiões são tipicamente de planalto, com quedas de água que permitem um ótimo aproveitamento para a geração de energia hidrelétrica (RODRIGUES; BATISTELA, 2013).

Nesse contexto, este trabalho objetiva explorar uma das principais UHEs do Brasil, a de Sobradinho. O projeto desta usina surgiu com o propósito de tornar a região do Nordeste autossuficiente em energia elétrica, além de regularizar as vazões do baixo rio São Francisco (SOUSA, 2017).

5. METODOLOGIA

5.1. Estruturação e Organização do Trabalho

O presente estudo foi realizado apoiando-se na metodologia proposta por Santos *et al.* (2020). O processo da estruturação do trabalho é apresentado no fluxograma a seguir (Figura 12).



Figura 12 - Fluxograma de Estruturação do Trabalho.
Fonte: elaborado pela autora (2024).

5.2. Caracterização da Área de Estudo

A Usina Hidrelétrica de Sobradinho (UHE Sobradinho) encontra-se situada na região hidrográfica do rio São Francisco, um dos rios mais importantes do Brasil. A bacia do rio São Francisco possui extensão total de 2.700 km, equivalente a 8% do território nacional, desde a nascente histórica na Serra da Canastra, no município de São Roque de Minas, em Minas Gerais, até a foz entre os municípios Piaçabuçu, em Alagoas, e Brejo Grande, em Sergipe (SOUZA, 2023). O Rio São Francisco perpassa os estados de Minas Gerais, Bahia, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e envolve parte do estado de Goiás e do Distrito Federal, abrangendo cerca de 504 municípios, 9% dos municípios do País, e aproximadamente 18 milhões de pessoas, segundo o censo demográfico do IBGE de 2010 (MDR, 2020).

A bacia do Rio São Francisco drena uma área de aproximadamente 634.000 km², englobando os biomas Cerrado, Caatinga e Mata Atlântica. Esses ecossistemas apresentam variações climáticas, com regiões de clima úmido e alta pluviosidade, bem como regiões de semiárido, com baixa pluviosidade e elevada evaporação (MACEDO, 2019). É importante ressaltar que cerca de 54% da bacia se encontra na região do semiárido (CBHSF, 2023), o que representa um grande desafio para a gestão dos recursos hídricos na região. Os biomas da bacia e a região do semiárido são apresentados na Figura 13.

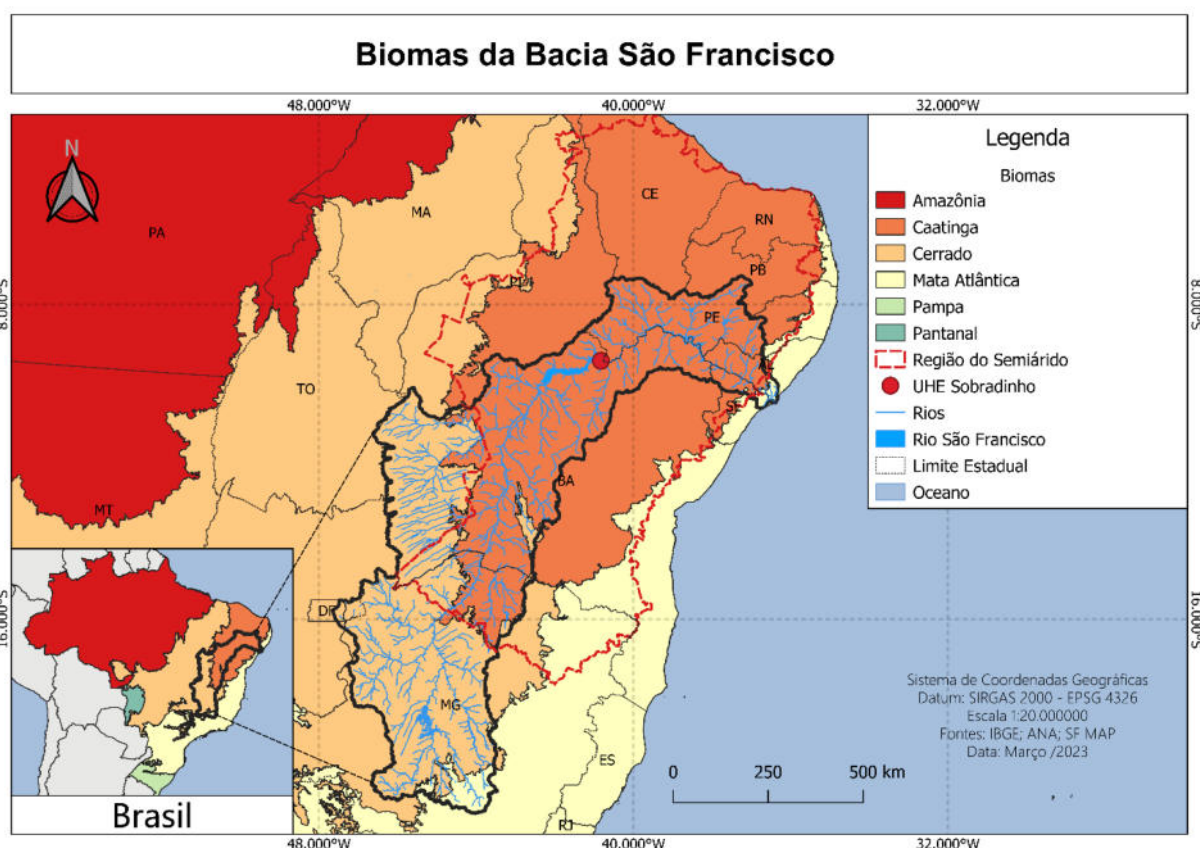


Figura 13 - Biomas da Bacia São Francisco.
Fonte: elaborado pela autora (2023).

De acordo com o Ministério do Meio Ambiente, rio São Francisco é dividido em quatro regiões fisiográficas: (i) Alto, (ii) Médio, (iii) Submédio e (iv) Baixo São Francisco. As principais características de cada região fisiográfica são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Características regiões fisiográficas da bacia hidrográfica do São Francisco.

Características	Alto	Médio	Submédio	Baixo
Área da Bacia (%)	16%	63%	17%	4%
Área da Bacia (km ²)	100.076 km ²	402.531 km ²	110.446 km ²	25.523 km ²
Extensão do Rio (km)	702 km	1.230 km	440 km	214 km
População (Milhões de hab.)	6.247 M	402.531 M	110.446 M	1.373 M
Clima	Predomínio de tropical úmido e temperado de altitude.	Predomínio de tropical semiárido e subúmido seco.	Predomínio de semiárido e árido.	Subúmido.
Precipitação Média Anual	Entre 1.000 mm e 2.000 mm.	Entre 600 mm e 1400 mm.	Entre 800 mm e 350 mm.	Entre 350 mm e 1500 mm.
Temperatura Média Anual	23°C	24°C	27°C	25°C
Vazão Média Anual Máxima	Pirapora 637 m ³ /s em fevereiro.	Juazeiro 4.393 m ³ /s em fevereiro.	Pão de Açúcar 4.660 m ³ /s em fevereiro.	Foz 9.999 m ³ /s em março.

Fonte: adaptado (MDR, 2024; SOUSA, 2023).

De acordo com Suassana (2008) a região do Alto São Francisco desempenha um papel fundamental na formação das enchentes do rio, devido às características do clima tropical úmido predominante nessa área. Nessa região, o período chuvoso concentra-se entre os meses de novembro e abril. Em contraste, outras regiões fisiográficas da bacia do Rio São Francisco, localizadas no semiárido, apresentam um regime climático marcado por chuvas mal distribuídas no tempo e no espaço.

Ainda segundo o autor, devido às irregularidades dos períodos chuvosos da região do semiárido e à baixa contribuição hídrica, especialmente durante secas prolongadas, ocorre uma significativa deficiência volumétrica na bacia. Essa situação resulta em prejuízos consideráveis, particularmente para o setor elétrico da região.

Como resposta a esses desafios, o barramento da Usina Hidrelétrica de Sobradinho (UHE Sobradinho) foi projetado e construído pela Eletrobras CHESF (1973), tendo como principal objetivo o acúmulo das águas provenientes da região alta da bacia, garantindo níveis satisfatórios para o sistema de geração de energia no Nordeste.

A barragem está instalada na divisa entre as regiões do Médio e Submédio São Francisco, em uma latitude de 9°43'S e longitude de 40°82''O, a cerca de 748 km da foz do Rio São Francisco (Figura 14). A estrutura está localizada entre os municípios de Sobradinho e Casa Nova no estado da Bahia, distando cerca de 59 km a montante das cidades de Juazeiro/BA e Petrolina/PE.

A estrutura é a principal fonte de regularização dos recursos hídricos da região, com uma vazão regularizada de 2.060 m³/s nos períodos de estiagem, permitindo a geração de energia nas demais usinas posicionadas na parte submédia da bacia do Rio São Francisco (SANTOS, 2019).

As obras da UHE Sobradinho tiveram início em junho de 1973 e finalizaram em novembro de 1979. Atualmente, a usina possui 6 unidades geradoras com potencial total de 1.050,3 MW de geração de energia.

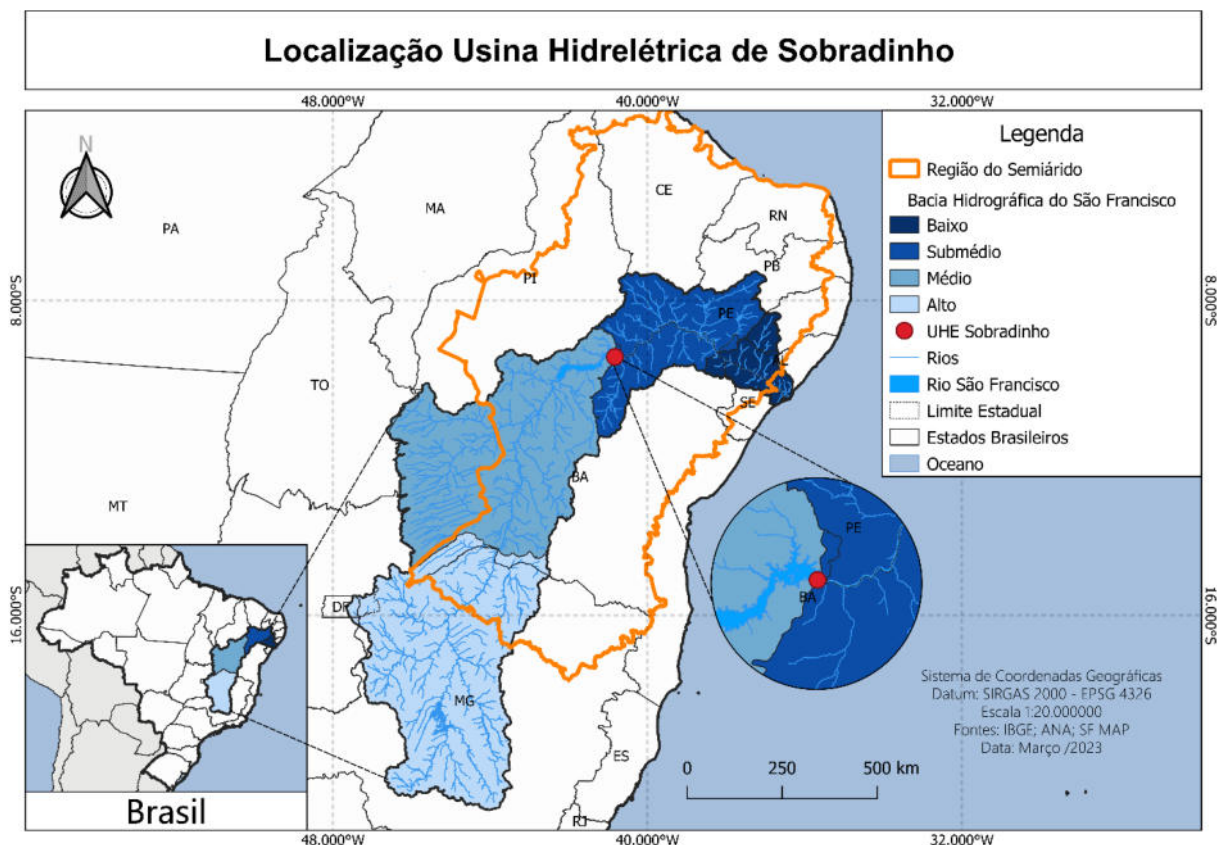


Figura 14 - Localização da Usina Hidrelétrica de Sobradinho.
Fonte: elaborado pela autora (2023).

O reservatório de regularização da usina tem aproximadamente 320 km de extensão, com uma superfície de espelho d'água de 4.214 km² e uma capacidade de armazenamento de 34,1 bilhões de metros cúbicos. Apresenta, ainda, 28,6 bilhões de metros cúbicos de volume útil em sua cota nominal de 392,50 m, constituindo-se o maior lago artificial da América Latina, em volume d'água, e o maior lago artificial do mundo em espelho d'água (CHESF, 2024). A Tabela 5 apresenta a ficha técnica com as principais características do empreendimento, enquanto a Figura 15 ilustra os elementos do barramento e do reservatório da Usina Hidrelétrica de Sobradinho.

Tabela 5 – Ficha Técnica da Usina Hidrelétrica de Sobradinho.

Principais Características Usina Hidrelétrica de Sobradinho		
Proprietário	Comitê de Bacias Hidrográfica do Rio São Francisco - CHESF	
Finalidade Principal	Geração de Energia Elétrica	
Outros Usos	Regularização Plurianual, Navegação, Controle de Cheias e Irrigação	
Início Obras	Junho de 1973	
Início Operação	Novembro de 1979	
Inauguração	Março de 1982	
Rio	São Francisco	
Longitude	40° 82' Oeste	
Latitude	9° 43' Sul	
Município/Estado	Sobradinho – BA	
Distância da Foz	747,80 km	
Potência Instalada	1.050.300 kW (6 UGs)	
Fiscalizador	Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL	
Categoria de Risco	Baixa	
Dano Potencial Associado	Alto	
Compleitude	Boa	
Barragem Principal		
Tipo	Terra-enrocamento	
Altura (Fundação)	41 m	
Altura (Terreno)	35,63 m	
Cota	397,5 m	
Comprimento	5.831 m	
Capacidade	38.971.98,0 m³	
Vertedouro		
Número de vãos	16	
Descarga de projeto	22.080 m³/s	
Reservatório		
Area do reservatório	4.214,30 km² (Cota 392,50 m)	
Volume total do reservatório	34.116 x 10⁶ m³	
Volume útil	28.669 x 10⁶ m³	
Comprimento	350 km	
Vazão Regularizada	2.060m³/s	
Níveis de Água		
N.A Mínimo Operativo Normal	380,50 m	
N.A Máximo Operativo Normal	392,50 m	
N.A Máximo <i>maximorum</i>	393,50 m	

Fonte: (CHESF & SNIS 2024).



Figura 15 – Elementos da Usina Hidrelétrica de Sobradinho.
 Fonte: Pedrosa (2023).

Conforme supracitado, o reservatório apresenta uma área de aproximadamente 4.214,30 km² e um volume de 34.116×10^6 m³ para o nível máximo normal. A Figura 16 apresenta o barramento e parte do reservatório da UHE. Segundo o Plano de Ação de Emergência (PAE) o remanso da estrutura termina próximo ao município de Xique-Xique (BA), a aproximadamente 300 km à montante da Usina, possibilitando assim uma vazão regularizada mínima do rio São Francisco 2.060 m³/s, que é utilizada pelo

sistema Paulo Afonso a jusante. Ainda segundo o documento a enchente do projeto afluente apresenta um pico de 27.270 m³/s para o tempo de recorrência – (TR) de 1.000 e uma vazão sanitária de 700 m³/s, seguindo a Resolução ANA nº 2.081/2017.



Figura 16 - Usina Hidrelétrica de Sobradinho.
Fonte: Viva o Sertão (2014).

5.3. Seleção das Estações Fluviométricas

Os dados das estações fluviométricas em análise foram obtidos por meio do portal HidroWeb da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Com o objetivo de compreender o comportamento do regime de vazões do Rio São Francisco, após a implementação da barragem da Usina Hidrelétrica de Sobradinho, selecionou-se para este estudo estações que atendessem aos seguintes critérios: (i) localização a jusante do barramento; (ii) pertencentes ao curso d'água principal do rio São Francisco; (iii) disponibilidade de dados de cota e vazão de pelo menos 20 anos anteriores à construção da usina; e (iv) possuir dados do perfil transversal.

Para tanto, foram selecionadas as estações fluviométricas dos municípios de Juazeiro (BA), situado a cerca de 50 km a jusante da Usina Hidrelétrica de Sobradinho (USB), e Santa Maria da Boa Vista (PE), localizada a aproximadamente 168 km a jusante da usina. A localização das estações é apresentada na Figura 17.

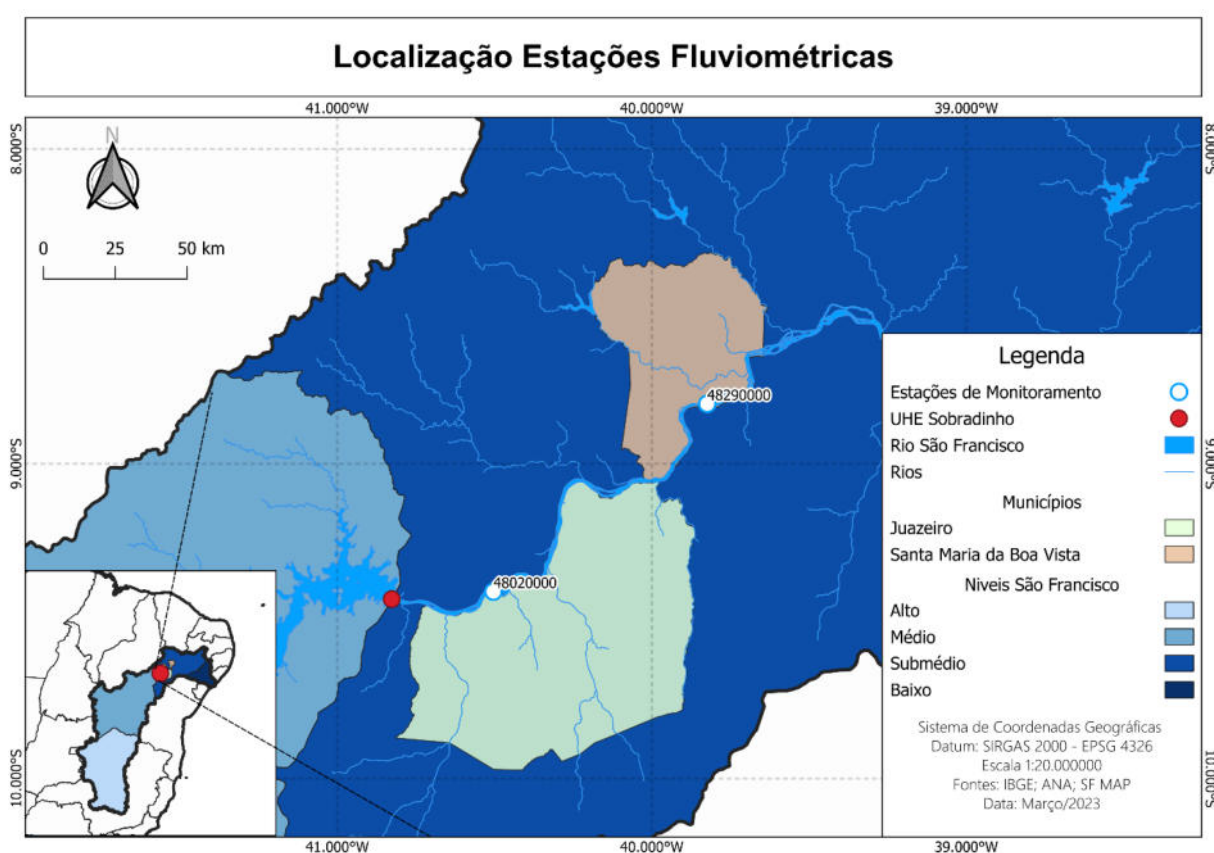


Figura 17 - Localização das Estações Fluviométricas
Fonte: elaborado pela autora (2023).

As estações fluviométricas selecionadas são gerenciadas pelo Serviço Geológico do Brasil (SGB). Algumas informações relevantes acerca dessas estações são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Informações das Estações.

Código	Localização	Operador	Coordenadas		Altitude (m)	Período de Dados
			Latitude	Longitude		
48020000	Juazeiro/BA	SGB	-9,406	-40,503	358,00	1929 a 2023
48290000	Santa Maria da Boa Vista/PE	SGB	-8,809	-39,823	344,00	1946 a 2023

Fonte: Hidroweb (2023).

Vale a pena destacar que a estação fluviométrica de Juazeiro (código ANA nº 48020000) é a mesma indicada pela Resolução ANA nº 2.081 de 2017, para a análise de defluências no reservatório, sendo essencial para a operação do sistema hídrico do Rio São Francisco.

5.4. Tratamento e Manipulação dos Dados

Embora o sistema Hidroweb disponibilize dados das estações nos períodos de 1929 a 2023, para Juazeiro, e de 1946 a 2023, para Santa Maria da Boa Vista, para este estudo foram analisados apenas dados consistidos que finalizam no ano de 2021. Dessa forma, considerou-se os períodos de 1929 a 2021, para Juazeiro e de 1946 a 2021, para Santa Maria da Boa Vista.

A fim de fornecer uma análise detalhada dos efeitos da construção da Usina Hidrelétrica de Sobradinho, com foco nos dados históricos de cota e vazão dos trechos do rio São Francisco correspondentes aos municípios de Juazeiro (BA) e Santa Maria da Boa Vista (PE), foram analisados os dados anteriores e posteriores ao início da construção da usina, visando determinar as possíveis mudanças ocorridas no regime hidrológico do rio e os possíveis impactos nas áreas de estudo. Ressalta-se que embora a UHE tenha entrado em operação em novembro de 1979, optou-se por adotar como período anterior a UHE os dados entre os anos de 1929 e 1973 e o período posterior com os dados de 1974 a 2021.

5.4.1. Regime de Vazões e Cota

Para caracterizar o regime de fluxo das regiões estudadas, foram elaboradas curvas de permanência, cotagramas e fluviogramas, utilizando os dados históricos disponibilizados pela ANA. Para a análise e avaliação dos efeitos do aproveitamento hidrelétrico levou-se em conta o período de construção da Usina Hidrelétrica de Sobradinho (1973 - 1979), bem como os períodos anteriores e posteriores previamente definidos.

Para relacionar as vazões do trecho antes e após o período de construção da UHE, foram avaliados os valores de referência de probabilidade (Equação 2) de 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 e 95% de permanência ($Q_5, Q_{10}, Q_{20}, Q_{30}, Q_{40}, Q_{50}, Q_{60}, Q_{70}, Q_{80}, Q_{90}, Q_{95}$). A comparação se deu por meio de um diagrama representativo de correlação, com o objetivo de avaliar as alterações geradas na vazão ao longo dos anos. As mesmas relações, avaliações e comparações foram realizadas com os valores de permanência de cotas diárias ($C_5, C_{10}, C_{20}, C_{30}, C_{40}, C_{50}, C_{60}, C_{70}, C_{80}, C_{90}, C_{95}$). As curvas de probabilidade foram manipuladas no *software* Excel®, utilizando-se os valores de diários de cota e vazão.

Após a elaboração das curvas, foram avaliados estatisticamente as diferenças das amostras de vazões e cota, antes e depois da implementação da Usina Hidrelétrica de Sobradinho utilizando o *software* Minitab® *Statistical* 19.0.

5.4.2. Análise Estatística

Para a realização da análise estatística dos dados no *software Minitab® Statistical 19.0*, foi necessário realizar a escolha do teste mais adequado para avaliar a comparação dos valores de cota e vazão antes e após a implementação da Usina Hidrelétrica (UHE).

Em relação aos dados de cota e vazão a serem comparados, foram inicialmente destacadas as seguintes observações:

- **Diferença entre duas amostras pareadas quantitativas**, como por exemplo, os valores de (Q_5) antes e após a implementação da UHE.
- **Dependência entre as amostras**, uma vez que os dados vazão (m^3/s) e cota (m) foram coletados mesmo rio e estação fluviométrica, porém em períodos diferentes.

Conforme descrito por Montgomery e Runger (2021), o teste t pareado é o mais adequado para a análise de duas amostras pareadas dependente. Contudo, este é um teste paramétrico, que pressupõe que a variável de interesse segue uma distribuição normal. Como alternativa não- paramétrica ao teste t, os autores recomendam o uso do teste de Wilcoxon para comparações de duas amostras pareadas em casos em que a normalidade não é atendida.

Para definir o método a ser aplicado (paramétrico ou não paramétrico), foi realizada a verificação da aderência dos dados à distribuição normal por meio do teste Anderson-Darling (A-D), com nível de significância de 5%, ou seja, α a 0,05.

A interpretação dos resultados seguiu as seguintes hipóteses:

- H_0 (Hipótese Nula): os dados seguem uma distribuição normal, há aderência entre os dados.
- H_1 (Hipótese Alternativa): os dados não seguem uma distribuição normal, não há aderência entre os dados.

Dessa forma, aplicou-se o seguinte critério de decisão:

$p - \text{valor} = 0 < 0,05 \rightarrow \text{Rejeita } H_0 \text{ aplicando-se o teste de Wilcoxon}$

$p - \text{valor} = > 0,05 \rightarrow \text{Aceita } H_0 \text{ aplicando-se o teste t pareado}$

Após a verificação da normalidade, os dados de amostras de vazão e cota foram inseridos no *software* Minitab® *Statistical* 19.0 para realização dos testes estatísticos, considerando-se o nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$). Para ambos os testes (t pareado e Wilcoxon), as hipóteses formuladas foram:

- H_0 (Hipótese Nula): Não há diferença estatisticamente significativa nos dados de vazão ou cota antes e após a implementação da UHE Sobradinho (mediana antes = mediana depois)
- H_1 (Hipótese Alternativa): Há diferença estatisticamente significativa nos dados de vazão ou cota antes e após a implementação da UHE Sobradinho (mediana antes $\neq$ mediana depois)

Onde,

$p - \text{valor} = 0 < 0,05 \rightarrow \text{Rejeita } H_0$

$p - \text{valor} = > 0,05 \rightarrow \text{Aceita } H_0$

5.5. Seção Transversal

A análise da seção transversal do rio é fundamental para compreender a geomorfologia e a dinâmica fluvial gerada pelo reservatório de regularização de vazão. No entanto, a série histórica de dados da seção transversal das estações analisadas é insuficiente para realizar uma comparação antes e após a implementação da UHE Sobradinho, visto que só foram disponibilizadas leituras após o ano de 1980. Dessa forma, para análise da seção transversal foram avaliadas as principais alterações ao longo do tempo, considerando as interferências decorrentes do processo de regularização ao longo dos anos, variações climáticas, erosão, assoreamento e outros processos naturais. Desça-se que assim como os dados de vazão e cota foram utilizados apenas os dados consistidos das estações que finalizam no ano de 2021.

Os perfis da seção transversal foram traçados pelo *software* Excel®, plotando os valores cota *versus* largura, das verticais do perfil, permitindo a visualização das principais transformações ocorridas no leito do rio ao longo dos anos.

5.6. Impactos da Regularização no Meio Urbano

A Usina Hidrelétrica de Sobradinho, além da função de geração de energia elétrica, apresenta-se como a principal fonte de regularização dos recursos hídricos da região. Diante disso, realizou-se uma pesquisa bibliográfica, utilizando artigos e noticiários dos municípios de Juazeiro/BA e Santa Maria da Boa Vista/PE, localizados a jusante da Usina Hidrelétrica de Sobradinho, com o objetivo de avaliar alguns dos possíveis impactos à população da região, considerando os usos não consuntivos (geração de energia, controle de cheias, pesca, navegação e aquicultura) e os usos consuntivos (irrigação, abastecimento urbano e rural e dessedentação de animais).

Além disso, foi realizada uma análise das demandas hídricas dos municípios, considerando os principais usos consuntivos da região. Para essa avaliação utilizou-se o banco de dados da Base Nacional de Referência de Usos Consuntivos da Água no Brasil, com dados de Demanda Hídrica Total e Setorial por Município - 1931 a 2040, que contempla informações sobre vazões de retirada e consumo hídrico (m^3/s), apresentando diagnósticos de 1931 a 2021 e projeções até 2040 (ANA, 2021).

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1.1. Regime de Vazões e Cota

Nos tópicos seguintes, serão apresentados os gráficos resultantes de permanência de vazão e cota para ambas as estações fluviométricas analisadas no presente estudo, acompanhados de suas respectivas análises.

Nos gráficos desenvolvidos são ilustrados o período completo, correspondente ao total da série histórica de dados constituídos entre os anos de 1929 e 2021 (em azul), o período anterior à implementação da UHE, isto é, de 1929 a 1973 (em vermelho), e, por fim, o período posterior à implementação da UHE, de 1974 a 2021 (em verde).

6.1.2. Regime de Vazões - Juazeiro (BA)

Para a estação fluviométrica nº 48020000, localizada no município de Juazeiro (BA), foram elaborados os fluviogramas e as curvas de permanência de vazão, apresentadas nas Figura 18 e Figura 19.

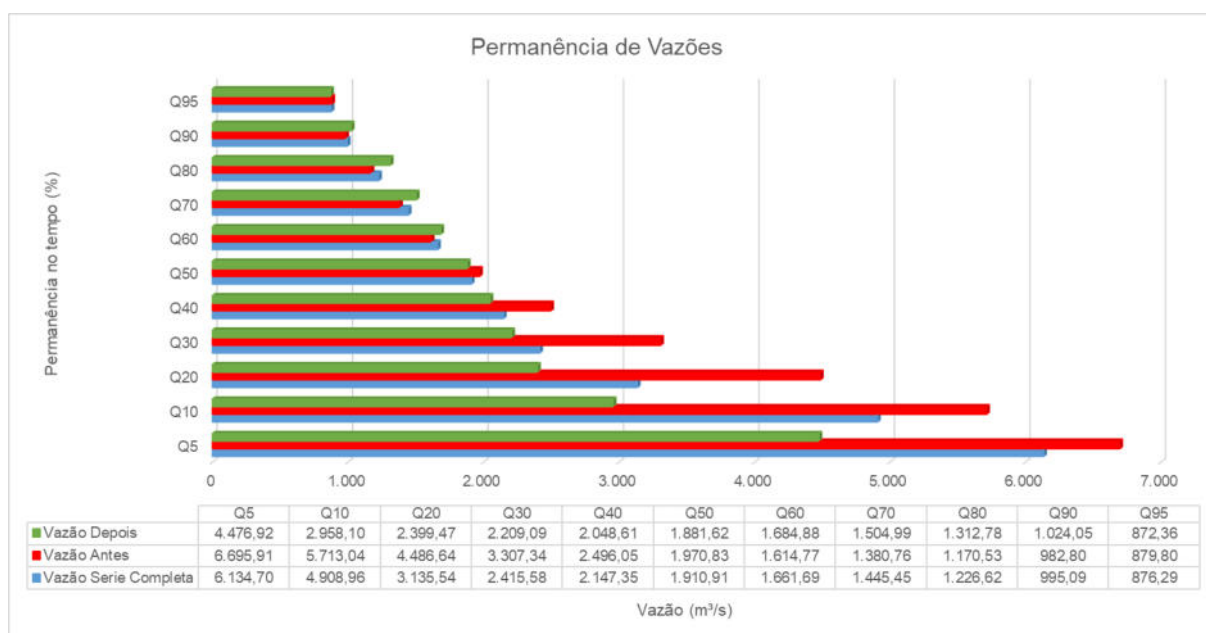


Figura 18 – Fluviograma – Comparativo - Estação nº 48020000.
Fonte: elaborado pela autora (2024).

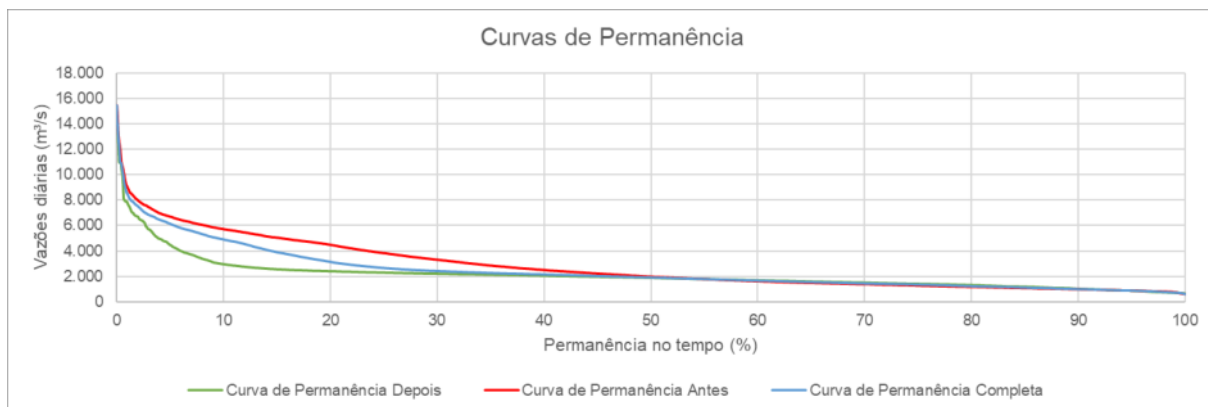


Figura 19 – Curva de Permanência de Vazões – Comparativo - Estação nº 48020000.

Fonte: elaborado pela autora (2024).

Para facilitar a interpretação dos resultados, calculou-se também as variações das vazões. A Tabela 7 apresenta as respectivas reduções e elevações da vazão com a implementação da UHE, em valores absolutos e percentuais.

Tabela 7 – Variação das Vazões Antes e Após a UHE - Estação nº 48020000.

	Vazão Série Histórica Completa (m³/s)	Vazão - Antes UHE (m³/s)	Vazão - Depois UHE (m³/s)	Diferença de Vazão (m³/s)	Modificação Percentual (%)
Q₅	6134,70	6695,91	4476,92	2218,99	-33,14%
Q₁₀	4908,96	5713,04	2958,10	2754,94	-48,22%
Q₂₀	3135,54	4486,64	2399,47	2087,16	-46,52%
Q₃₀	2415,58	3307,34	2209,09	1098,24	-33,21%
Q₄₀	2147,35	2496,05	2048,61	447,44	-17,93%
Q₅₀	1910,91	1970,83	1881,62	89,21	-4,53%
Q₆₀	1661,69	1614,77	1684,88	-70,10	4,34%
Q₇₀	1445,45	1380,76	1504,99	-124,23	9,00%
Q₈₀	1226,62	1170,53	1312,78	-142,25	12,15%
Q₉₀	995,09	982,80	1024,05	-41,25	4,20%
Q₉₅	876,29	879,80	872,36	7,44	-0,85%

Fonte: elaborado pela autora (2024).

Na avaliação estatística, conforme distrito na metodologia verificou-se primeiramente a aderência normalidade dos dados de vazão antes e depois da implementação da UHE, com o objetivo de verificar a aplicação do teste t pareado ou Wilconxon para análise. A Figura 20 apresenta os gráficos de probabilidade de ambas as amostras.

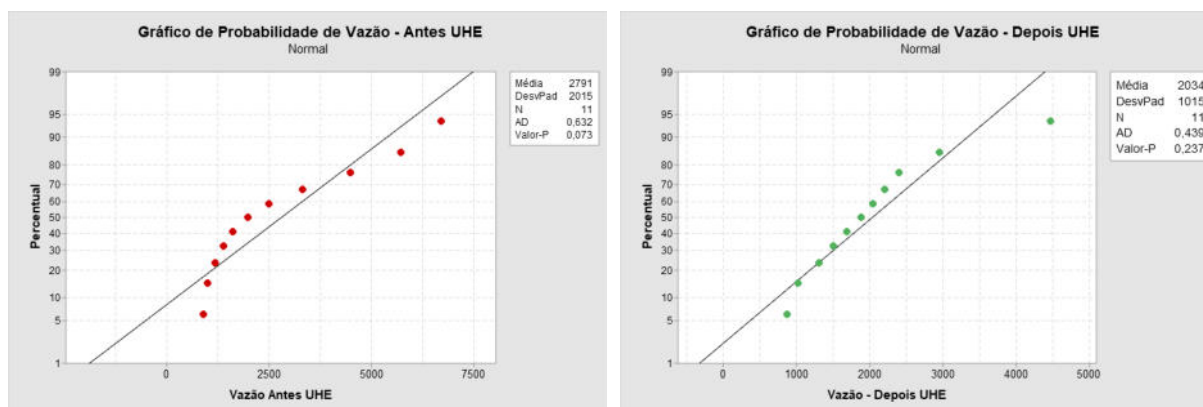


Figura 20 – Normalidade Vazão - Estação nº 48020000.

Fonte: elaborado pela autora (2024).

Os resultados do teste de aderência indicam que para um nível de significância de 5%, as amostras coletadas antes e depois da implementação da UHE apresentam um p-valor superior α (0,05), aceitando-se a hipótese nula, onde as amostras se ajustam a distribuição normal.

Assim, com os resultados indicando a aderência dos dados à distribuição normal, aplicou-se o teste t pareado com objetivo de comparar os valores de vazão da estação de Juazeiro, antes e após a implementação da UHE.

Os resultados da análise do teste t pareado, calculado por meio do *software* Minitab são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Resultados do teste t Pareado - Vazões - Estação nº 48020000.

Estatísticas Descritivas				
Amostra	Nº Amostras	Média	Desvio Padrão	EP Média
Vazão Antes UHE	11	2791	2015	608
Vazão Depois UHE	11	2034	1015	306
Estimativa da Diferença Pareada				
Média	Desvio Padrão	EP Média	Intervalo de Confiança (IC) de 95% da diferença das médias (μ)	
757	1097	331	(20; 1494)	
Teste de Hipóteses				
Hipótese nula	H_0 : diferença_μ = 0			
Hipótese alternativa	H_1 : diferença_μ ≠ 0			
Valor-T	Valor-p			
2.29	0.045			

Fonte: elaborado pela autora (2024).

Os resultados da aplicação do teste t pareado para o nível de significância de 5%, indica que há evidências estatísticas de uma diferença significativa entre as vazões da Estação nº 48020000 observadas antes e depois da construção da Usina Hidrelétrica (UHE), conforme indicado pelo *p-valor* de 0,045, valor inferior a α (0,05) rejeitando-se assim a hipótese nula em favor da hipótese alternativa (mediana antes $\neq$ mediana depois).

Com relação aos gráficos anteriormente apresentados, os resultados demonstram uma redução significativa das vazões máximas, Q_5 a Q_{30} , com reduções superiores a 30% após a implementação da UHE. Em relação às vazões médias Q_{40} e Q_{50} , a diferença entre antes e depois é menor, com uma redução de 17,93% para a Q_{40} e de apenas 4,53% para a Q_{50} .

Por outro lado, ao analisar as vazões mínimas de Q_{60} a Q_{90} foi possível observar um aumento menos expressivo, sendo o maior para a Q_{80} , de 12,15%. Esses resultados são condizentes com o papel de regularização da vazão da estrutura, uma vez que, conforme destacado por Martins *et al.* (2011) e outras literaturas, é comum a diminuição das vazões máximas e elevação das vazões mínimas em rios regularizados.

Contudo, para a vazão mínima Q_{95} (vazão de maior garantia), observou-se uma pequena redução de 0,85% após a implementação da Usina. Tendo em vista que a UHE de Sobradinho, é operada por armazenamento de água em seu reservatório (Figura 8), onde as vazões afluentes são superiores às vazões defluentes, o contexto de operação da estrutura torna a redução da vazão mínima Q_{95} incoerente com o processo esperado de regularização da vazão.

Conforme também destacado em revisão de literatura, em estudo do impacto da construção da usina hidrelétrica de Sobradinho no regime de vazões realizado por Martins *et al.* (2011), foi encontrado o comportamento de redução das vazões mínimas para as estações Piranhas, Traipu e Propriá (Figura 9), onde os autores atribuíram tais resultados à curta série histórica de dados anterior à construção do complexo de Sobradinho, onde o período analisado foi de 1977 a 2007, considerando aproximadamente três anos de dados antes do início da operação da usina (1979).

Por outro lado, no mesmo estudo, na avaliação da estação Pão de Açúcar que apresenta uma série histórica mais extensa (1959 a 2007), com um intervalo de 20 anos de dados antes da operação, foi observado o padrão de regularização com a redução das vazões máximas e o aumento das vazões mínimas.

A análise para a estação de Juazeiro, realizada no presente estudo, considerou um intervalo de mais de quarenta anos de dados de vazão antes do início da construção da usina. Portanto, a incoerência observada na vazão mínima Q_{95} , não pode ser atribuída à curta série histórica, uma vez que, conforme exposto por Martins *et al.* (2011), em séries históricas com vinte anos ou mais já é possível observar os efeitos do processo de regularização.

Diante disso, levanta-se a hipótese de que a redução no valor de Q_{95} possa estar associada ao período de construção da usina (1973 a 1979), considerado no presente estudo como parte do intervalo de dados pós-implementação. Conforme supracitado, essa metodologia foi adotada com o intuito de suprir as possíveis interferências de vazões causadas durante o período de construção da estrutura, uma vez que o alteamento dos maciços da barragem e diques da estrutura poderiam ter provocado alterações no regime de vazões do Rio São Francisco. No entanto, também é possível que essas alterações durante o período de construção não tenham sido suficientemente significativas para impactar as vazões durante a análise, sendo possível observar impactos somente após o fechamento das comportas em 1979.

Por outro lado, conforme anteriormente destacado por Barbosa Júnior (2022) na gestão de recursos hídricos a vazão de 95% de permanência (Q_{95}) é amplamente adotada como referência para a concessão de outorgas de uso da água ou para a definição da vazão ecológica/vazão sanitária. A Q_{95} é a vazão adotada para os rios de jurisdição federal, cuja gestão de recursos hídricos é de responsabilidade da ANA, como é o caso o Rio São Francisco. Portanto, a redução observada na Q_{95} pode também estar relacionada ao atendimento da CHESF, para liberar vazões mínimas médias diárias de 700 m³/s, conforme preconizado na Resolução ANA nº 2.081 de 2017 ou ao aumento das concessões de outorgas ao longo dos anos. Complementarmente, vale mencionar que o período analisado após a implementação da barragem neste estudo é maior e mais recente do que o período avaliado por

Martins *et al.* (2011), o que também pode evidenciar uma alteração de operação do reservatório.

Apesar dos resultados contraditórios da Q_{95} , o comportamento de redução das vazões máximas no Rio São Francisco evidencia um dos efeitos positivo do processo de regularização, ao minimizar os impactos das grandes cheias na região à jusante da estrutura. Além disso, o aumento das vazões mínimas de Q_{60} a Q_{90} , que foram coerentes ao esperado pela regularização, refletem o controle e preocupação exercida pela CHESF e os órgão reguladores com o aumento da disponibilidade hídrica da região do semiárido durante os períodos de estiagem.

6.1.3. Regime de Cotas - Juazeiro (BA)

Para a estação fluviométrica nº 48020000, localizada no município de Juazeiro (BA), foram elaborados também cotogramas e as curvas de permanência de cota, apresentadas nas Figura 21 e Figura 22. A Tabela 9 apresenta as respectivas reduções e elevações da cota com a implementação da UHE, em valores absolutos e percentuais.

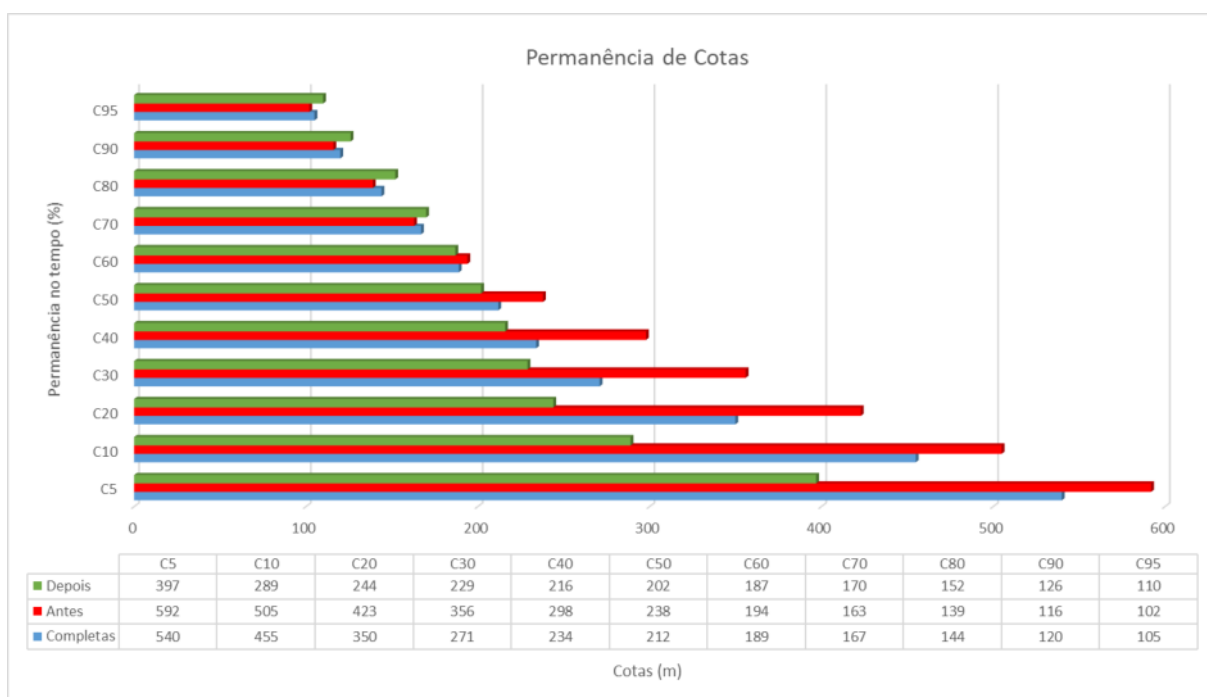


Figura 21 – Cotograma – Comparativo - Estação nº 48020000
Fonte: elaborado pela autora (2024).

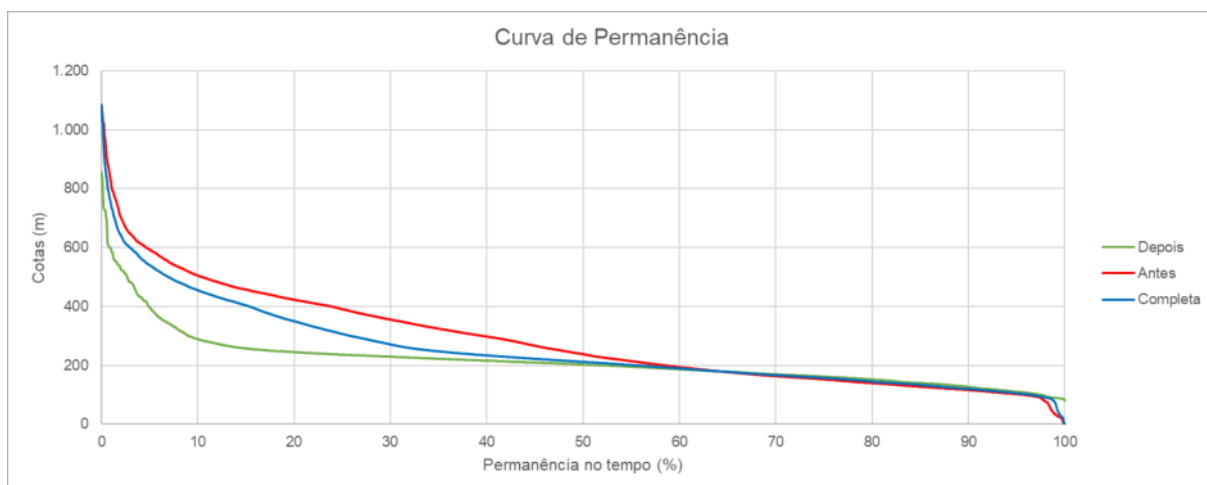


Figura 22 – Curva de Permanência de Cotas – Comparativo - Estação nº 48020000.
Fonte: elaborado pela autora (2024).

Tabela 9 – Variação das Cotas Antes e Após UHE - Estação nº 48020000.

	Cota da Serie Completa (m)	Cota - Antes UHE (m)	Cota – Depois UHE (m)	Diferença de Cota (m)	Modificação Percentual (%)
C₅	540,00	592,00	397,00	195,00	-32,94%
C₁₀	455,00	505,00	289,00	216,00	-42,77%
C₂₀	350,00	423,00	244,00	179,00	-42,32%
C₃₀	271,00	356,00	229,00	127,00	-35,67%
C₄₀	234,00	298,00	216,00	82,00	-27,52%
C₅₀	212,00	238,00	202,00	36,00	-15,13%
C₆₀	189,00	194,00	187,00	7,00	-3,61%
C₇₀	167,00	163,00	170,00	-7,00	4,29%
C₈₀	144,00	139,00	152,00	-13,00	9,35%
C₉₀	120,00	116,00	126,00	-10,00	8,62%
C₉₅	105,00	102,00	110,00	-8,00	7,84%

Fonte: elaborado pela autora (2024).

Assim como realizado para os dados de vazão, realizou-se a análise estatística das cotas, verificando-se a aderência dos dados antes e depois da implementação da UHE a distribuição normal. A Figura 23 apresenta os gráficos de normalidade dessas amostras.

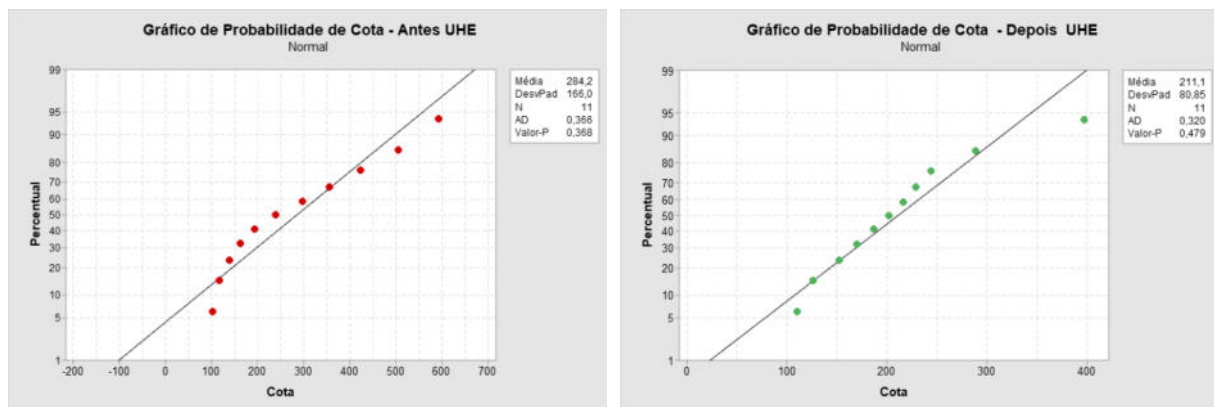


Figura 23 – Normalidade Cotas - Estação nº 48020000.

Fonte: elaborado pela autora (2024).

Ao analisar os gráficos de ajuste à normalidade, observa-se que os valores de cota da estação de Juazeiro também seguem uma distribuição normal para um nível de significância de 5%. O p-valor é superior α (0,05) aceitando-se a hipótese nula.

Dessa forma, com os resultados indicando a aderência a distribuição normal para os valores de cota, aplicou-se também o teste t pareado para verificar a diferença entre

as amostras. O resultado do teste extraído do *software* Minitab é apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 – Resultados do Teste t pareado – Cotas - Estação nº 48020000.				
Estatísticas Descritivas				
Amostra	N	Média	Desvio Padrão	EP Média
Cotas Antes UHE	11	11	284,2	166,0
Cotas Depois UHE	11	11	211,1	80,8
Estimativa da Diferença Pareada				
Média	Desvio Padrão	EP Média	Intervalo de Confiança (IC) de 95% da diferença das médias (μ)	
73,1	90,8	27,4	(12,1; 134,1)	
Teste de Hipóteses				
Hipótese nula	H_0 : diferença_ μ = 0			
Hipótese alternativa	H_1 : diferença_ μ $\neq$ 0			
Valor-T	Valor-p			
2,67	0,024			

Fonte: elaborado pela autora (2024).

Os resultados da aplicação do teste t pareado para o nível de significância de 5%, apresentam que há evidências estatísticas de uma diferença significativa entre as cotas da Estação nº 48020000 observadas antes e depois da construção da Usina Hidrelétrica (UHE), conforme indicado pelo p-valor de 0,024, valor inferior a α (0,05) rejeitando-se também a hipótese nula em favor da hipótese alternativa (mediana antes $\neq$ mediana depois).

Ao avaliar graficamente os resultados comparativos das curvas de permanência, observa-se que a curva de cota antes da implementação da UHE se posiciona acima das demais, especialmente nos valores mais baixos de permanência no tempo, até aproximadamente 60%, e praticamente se sobrepõem após esse período. O comportamento sugere que as cotas mínimas apresentam um comportamento similar, indicando uma estabilização dos níveis de água.

Assim, com a análise gráfica, os resultados calculados evidenciam o impacto da construção da usina em relação aos níveis d'água a jusante da estrutura, sendo possível observar uma tendência de redução nas cotas máximas até aproximadamente C_{60} e a elevação das cotas mínimas C_{70} a C_{95} .

Os resultados apresentados são coerentes com as alterações encontradas no regime de vazões da estação, e indicam que a diminuição das cotas de menores permanências reflete o impacto da usina sobre o regime hidrológico da região, resultando em uma redução no N.A em comparação ao período anterior à sua construção. Evidencia-se, assim, a eficácia da estrutura quanto ao controle de cheias e processos de inundação a jusante.

6.1.4. Regime de Vazão - Santa Maria da Boa Vista (PE)

Na estação fluviométrica nº 48290000, localizada no município de Santa Maria da Boa Vista (PE), realizou-se os mesmos gráficos apresentados para a estação de Juazeiro, os fluviogramas e as curvas de permanência de vazão, apresentadas nas Figura 24 e Figura 25. A Tabela 11 apresenta as respectivas reduções e elevações da vazão com a implementação da UHE, em valores absolutos e percentuais.

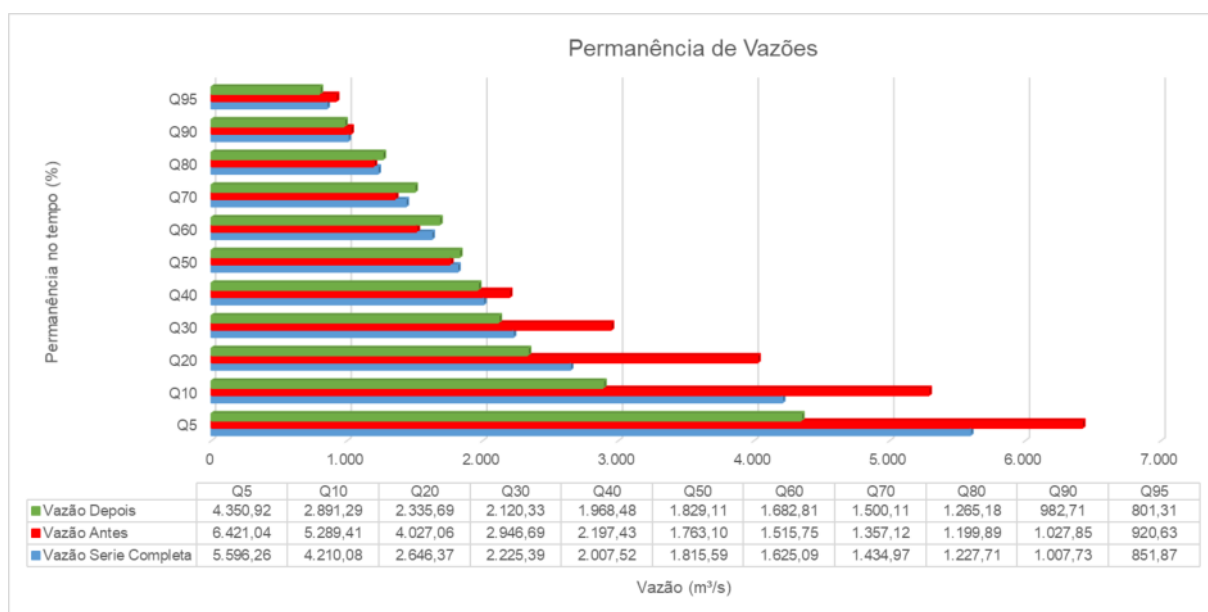


Figura 24 – Fluviograma – Comparativo - Estação nº 48290000.
Fonte: elaborado pela autora (2024).

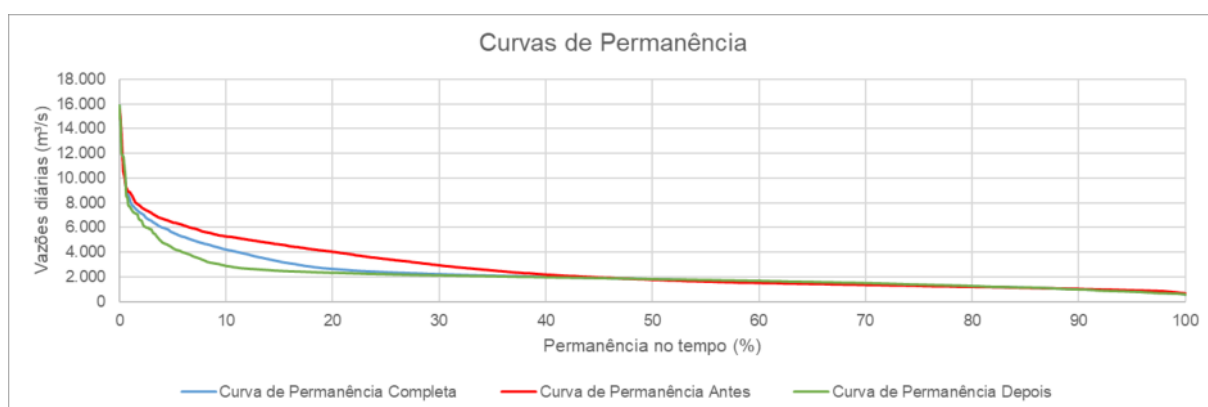


Figura 25 – Curva de Permanência de Cotas – Comparativo - Estação nº 48290000.
Fonte: elaborado pela autora (2024).

Tabela 11 – Variação das Vazões Antes e Após UHE - Estação nº 48290000.

	Vazão Série Histórica Completa (m³/s)	Vazão - Antes UHE (m³/s)	Vazão – Depois UHE (m³/s)	Diferença de Vazão (m³/s)	Modificação Percentual (%)
Q₅	5.596,26	6.421,04	4.350,92	2.070,11	-32,24%
Q₁₀	4.210,08	5.289,41	2.891,29	2.398,13	-45,34%
Q₂₀	2.646,37	4.027,06	2.335,69	1.691,36	-42,00%
Q₃₀	2.225,39	2.946,69	2.120,33	826,36	-28,04%
Q₄₀	2.007,52	2.197,43	1.968,48	228,96	-10,42%
Q₅₀	1.815,59	1.763,10	1.829,11	-66,01	3,74%
Q₆₀	1.625,09	1.515,75	1.682,81	-167,06	11,02%
Q₇₀	1.434,97	1.357,12	1.500,11	-142,98	10,54%
Q₈₀	1.227,71	1.199,89	1.265,18	-65,29	5,44%
Q₉₀	1.007,73	1.027,85	982,71	45,14	-4,39%
Q₉₅	851,87	920,63	801,31	119,33	-12,96%

Fonte: elaborado pela autora (2024).

Assim como realizado na estação anterior, foi verificada a aderência dos dados de vazão antes e depois da implementação da UHE à distribuição normal. Os resultados dos gráficos de probabilidade gerados no Minitab são apresentados na Figura 26.

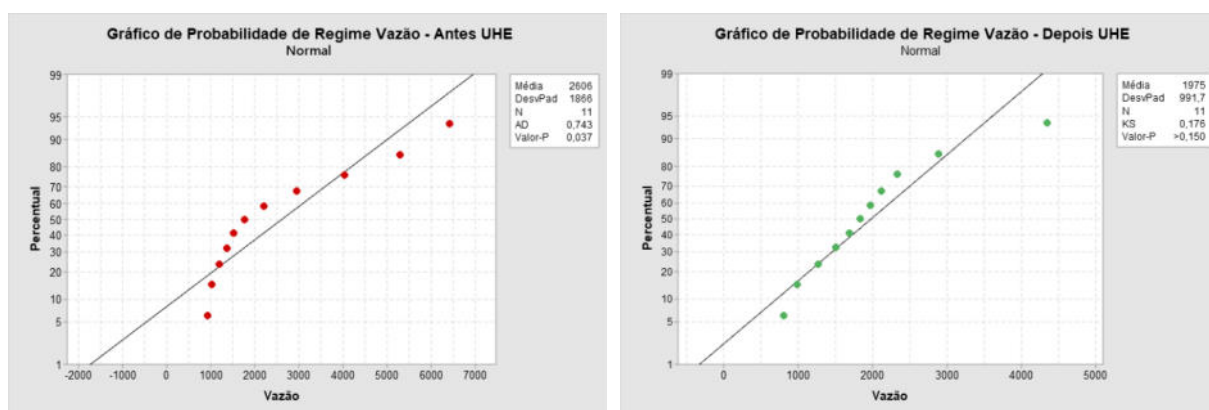


Figura 26 – Normalidade Vazão - Estação nº 48290000.

Fonte: elaborado pela autora (2024).

Ao analisar os gráficos de ajuste à normalidade, observa-se que os valores de vazão da estação seguem uma distribuição normal para um nível de significância de 5% somente para os dados de vazão antes a implementação da UHE, visto que o p-valor das amostras após a implementação é superior a α (0,05) p-valor depois da UHE é $> 0,15$. Dessa forma, os dados não satisfazem o critério para aplicabilidade do teste t pareado.

Conforme descrito na metodologia, quando as amostras não seguirem a distribuição normal, ou seja, apresentar p-valor for superior a α (0,05) será aplicado o teste de Wilcoxon. Os resultados do teste de Wilcoxon extraídos do *software* Minitab são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Resultados do teste de Postos Sinalizados de Wilcoxon - Vazão - Estação nº 48290000

Estatísticas Descritivas				
Amostra	Nº de Amostra	Medianas	Intervalo de Confiança (IC) de 95% das medianas (η)	Confiança Atingida
Vazão Antes UHE	11	2293,06	(1278,51; 3968,39)	95,46%
Vazão Depois UHE	11	1837,70	(1332,76; 2666,82)	95,46%
Diferença Antes e Depois UHE	11	454,30	(-60,96; 1258,72)	95,46%
Teste de Hipoteses				
Hipótese nula	$H_0: \eta = 0$			
Hipótese alternativa	$H_1: \eta \neq 0$			
Amostra	Nº Amostras do Teste	Estatística de Wilcoxon		Valor-p
Diferença Antes e Depois UHE	11	50,00		0,142

Assim, com os resultados do teste de Wilcoxon, realizado com nível de significância de 5%, conclui-se que não há evidências estatísticas de uma diferença significativa entre as vazões da Estação nº 48290000 observadas antes e após a construção da Usina Hidrelétrica (UHE), conforme indicado pelo p-valor superior a α (0,05) de 0,142.

Com relação as análises gráficas, os resultados de permanência de vazão, apresentados para a estação de Santa Maria da Boa Vista (PE), são semelhantes aos resultados da estação de Juazeiro, e demonstram uma redução das vazões máximas, Q_5 a Q_{40} após a implementação da UHE, sendo essas superiores a 28%. Nas vazões médias de Q_{50} e as vazões mínimas (Q_{60} e Q_{80}) foi possível observar um leve aumento, especialmente em relação à Q_{60} , com 11,02%. Esses resultados são condizentes com o papel de regularização da vazão da estrutura, conforme exposto por Martins *et al.* (2011).

Por outro lado, ao se observar as vazões mínimas Q_{90} e Q_{95} , novamente nota-se um comportamento contraditório, com redução dos valores das vazões na ordem de 4,39% e 12,96%, respectivamente, após a implantação da UHE. Ou seja, os resultados estão ainda mais inconsistentes do que os apresentados na estação de Juazeiro, pois apresentam reduções com grandezas superiores.

Ressalta-se que para a estação de Santa Maria da Boa Vista o período avaliado antes da construção da usina hidrelétrica é correspondente a 27 anos. Assim, acredita-se que as incoerências observadas nas vazões mínimas Q_{90} e Q_{95} , também não podem ser atribuídas à curta série histórica, uma vez que, conforme supracitado, em séries históricas com 20 anos ou mais de dados já é possível observar os efeitos de regularização, conforme apresentado por Martins *et al.* (2011). Esse resultado também reforça a hipótese de que a redução dos valores de vazões mínimas possa estar associada à uma estratégia de operação da Usina.

6.1.5. Regime de Cotas - Santa Maria da Boa Vista (PE)

Para a estação fluviométrica nº 48290000, localizada no município de Santa Maria da Boa Vista (PE), foram elaborados também cotogramas e as curvas de permanência de cota, apresentadas nas Figura 27 e Figura 28. A Tabela 13 apresenta as respectivas reduções e elevações da cota com a implementação da UHE, em valores absolutos e percentuais.

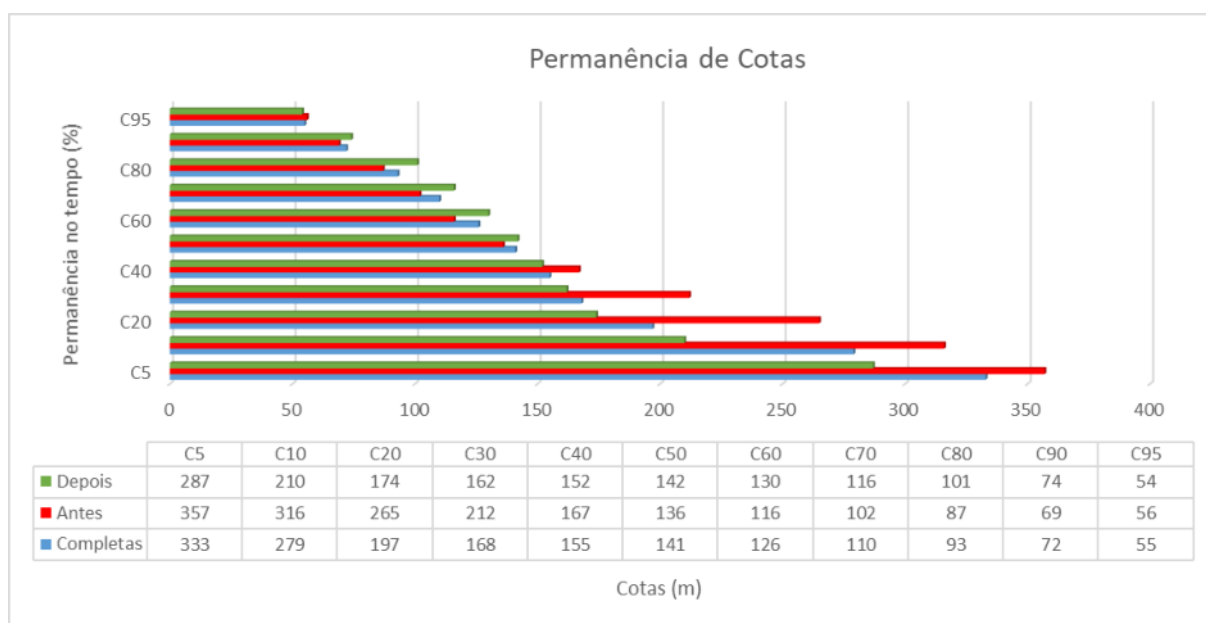


Figura 27 – Cotograma – Comparativo - Estação nº 48290000.
Fonte: elaborado pela autora (2024).

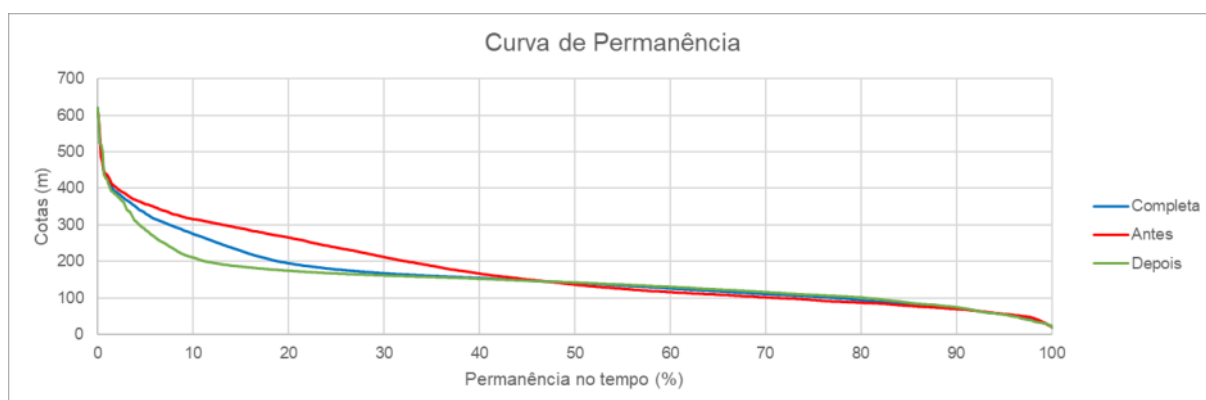


Figura 28 – Curva de Permanência de Cotas – Comparativo - Estação nº 48290000.
Fonte: elaborado pela autora (2024).

Tabela 13 – Variação das Cotas Antes e Após UHE - Estação nº 48290000

	Cota da Serie Completa (m)	Cota - Antes UHE (m)	Cota – Depois UHE (m)	Diferença de Cota (m)	Modificação Percentual (%)
C₅	333,00	357,00	287,00	70,00	-19,61%
C₁₀	279,00	316,00	210,00	106,00	-33,54%
C₂₀	197,00	265,00	174,00	91,00	-34,34%
C₃₀	168,00	212,00	162,00	50,00	-23,58%
C₄₀	155,00	167,00	152,00	15,00	-8,98%
C₅₀	141,00	136,00	142,00	-6,00	4,41%
C₆₀	126,00	116,00	130,00	-14,00	12,07%
C₇₀	110,00	102,00	116,00	-14,00	13,73%
C₈₀	93,00	87,00	101,00	-14,00	16,09%
C₉₀	72,00	69,00	74,00	-5,00	7,25%
C₉₅	55,00	56,00	54,00	2,00	-3,57%

Fonte: elaborado pela autora (2024).

Para a análise estatística das cotas da estação, realizou-se também o teste de aderência normalidade dos dados de cota antes e depois da implementação da UHE. A Figura 29 apresenta os resultados do teste.

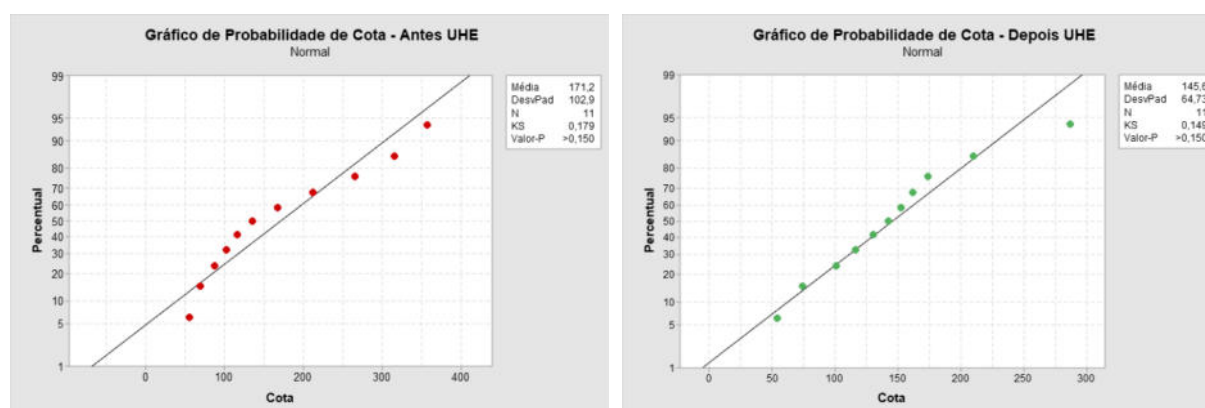


Figura 29 – Normalidade Cotas - Estação nº 48290000.

Fonte: elaborado pela autora (2024).

Ao analisar os gráficos de ajuste à normalidade, observa-se que os valores de cota da estação não seguem uma distribuição normal para um nível de significância de 5%. visto que o p-valor das amostras após a implemetação é superior a α (0,05) . Dessa forma não é possível aplicar o teste t pareado para verificar a diferença entre as duas amostras.

Assim como realizado com os valores de vazão da estação, será aplicado o teste de Wilcoxon. Os resultados do teste de Wilcoxon extraídos do *software* Minitab são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 - Resultados do teste de Postos Sinalizados de Wilcoxon - Vazão - Estação nº 48290000

Estatísticas Descritivas				
Amostra	Nº de Amostra	Medianas	Intervalo de Confiança (IC) de 95% das medianas (η)	Confiança Atingida
Cota Antes UHE	11	165,50	(94,5; 241,5)	95,46%
Cota Depois UHE	11	141,50	(102; 192)	95,46%
Diferença Antes e Depois UHE	11	24,25	(-9,5; 54)	95,46%
Teste de Hipoteses				
Hipótese nula	$H_0: \eta = 0$			
Hipótese alternativa	$H_1: \eta \neq 0$			
Amostra	Nº Amostras do Teste	Estatística de Wilcoxon	Valor-p	
Diferença de Cotas Antes e Depois UHE	11	46,00	0,266	

Dado que as amostras pareadas de cotas não se ajustaram à distribuição normal, com o auxílio do teste não paramétrico de Wilcoxon, conclui-se que não há evidências estatísticas de uma diferença significativa entre as cotas da Estação nº 48290000 observadas antes e após a construção da Usina Hidrelétrica (UHE), conforme indicado pelo p-valor de 0,266 superior a α (0,05).

Ao avaliar graficamente os resultados comparativos das curvas de permanência, observa-se que a curva de cota antes da implementação da UHE se posiciona acima das demais, especialmente nos valores mais baixos de permanência no tempo, até aproximadamente 50%. Esses resultados indicam que o N.A do Rio São Francisco era geralmente mais elevado antes da construção da usina. Após 60% de permanência, as curvas praticamente se sobrepõem. Esse comportamento sugere que, para as cotas máximas, tem-se um comportamento similar, indicando uma estabilização dos níveis de água devido ao processo de regularização.

No cotograma comparativo fica ainda mais evidente que até os 40% de permanência dos níveis de água, antes da implementação da UHE, há maior permanência no tempo e a partir dos 50% há uma inversão, com um pequeno aumento das cotas até os 95%

de permanência. Esses resultados são coerentes com as alterações encontradas no regime de vazões da estação, e indicam que a diminuição das cotas para menores permanências reflete o impacto da usina sobre o regime hidrológico da região, resultando em uma redução no N.A em comparação ao período anterior à sua construção.

Por outro lado, na análise da C_{95} observou-se um resultado distinto ao observado na estação de Juazeiro (BA), apresentando uma redução de 3,57% do valor de cota no período posterior à implementação da Usina. Esse resultado também se mostrou contraditório aos resultados esperados na regularização.

Além dos apontamentos já realizados, outra possível justificativa para este comportamento pode estar associada aos perfis da seção transversal do rio, onde são realizados os levantamentos de cotas destas estações. Neste sentido, foram avaliadas as alterações do perfil transversal das estações analisadas.

6.2. Seção Transversal

A seguir são apresentados os gráficos resultantes da seção transversal para ambas as estações fluviométricas analisadas no presente estudo, juntamente com suas respectivas análises de transformações ocorridas ao longo dos anos.

6.2.1. Seção Transversal - Juazeiro (BA)

A base de dados da ANA disponibilizou seções transversais para esta estação no período de 1984 a 2022, permitindo a geração de 22 seções. Entretanto para facilitar a visualização, foram selecionadas as seções transversais que apresentaram maiores variações, as quais foram representadas graficamente, conforme ilustrado na Figura 30. Para esta estação foi não foi considerada a seção corresponde ao ano de 2022, pois os dados foram classificados como brutos.

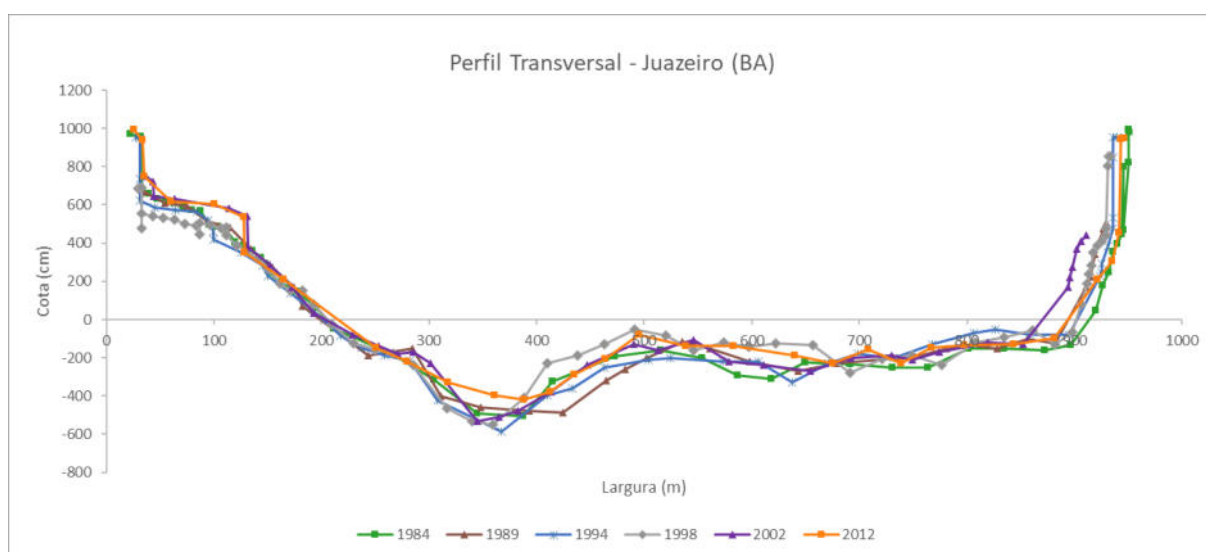


Figura 30 – Seção Transversal - Estação nº 48020000.

Fonte: elaborado pela autora (2024).

Com a análise gráfica, é possível observar pouca variação nas extremidades das seções transversais, indicando que as bordas do perfil permaneceram relativamente estáveis ao longo do tempo.

Ao longo dos anos, ocorreram poucas variações, sendo identificados padrões de elevação e rebaixamento de cotas em pontos específicos. Por exemplo, em áreas próximas 80m a 120m de largura e de 300 m a 700 m de largura, há evidências de

elevação de cota, possivelmente atribuídas a processos de sedimentação. Por outro lado, em algumas regiões, o rebaixamento sugere a ocorrência de erosão.

Foi realizada uma avaliação mais detalhada das alterações em intervalos de aproximadamente 10 anos, destacando os seguintes períodos:

6.2.1.1. Entre 1984 e 1994:

As seções transversais para os anos são apresentadas na Figura 31 e a análise descrita a seguir.

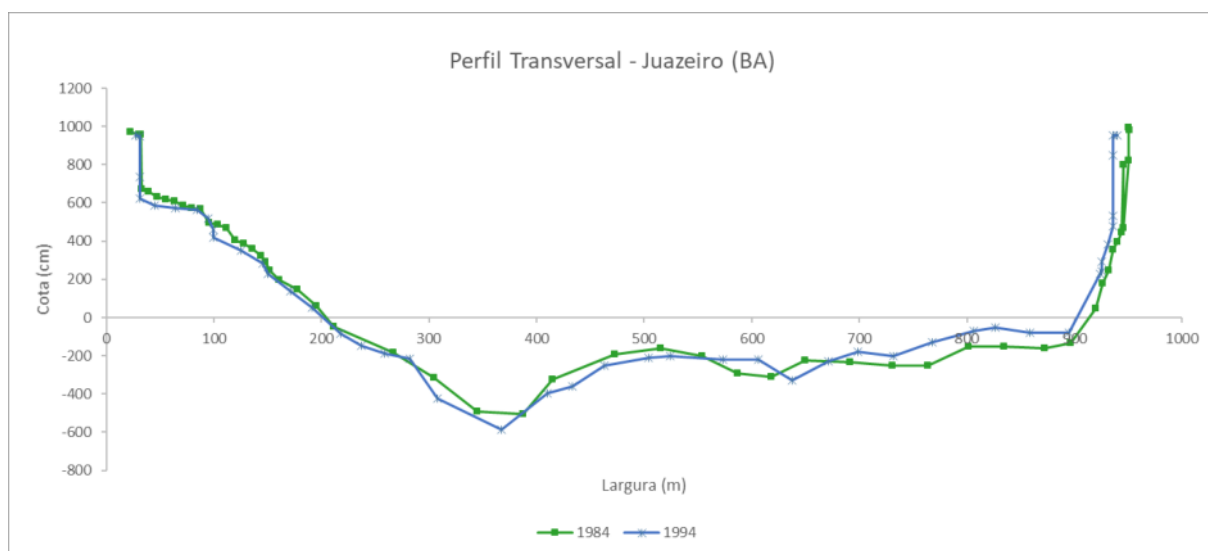


Figura 31 – Seção Transversal 1984 a 1994 - Estação nº 48020000.
Fonte: elaborado pela autora (2024).

- Observou-se um pequeno nas cotas em alguns pontos centrais do bordo direito a partir dos 580 m de largura, indicando possível ocorrência do processo de sedimentação e sugerindo acúmulo de sedimentos na região.
- Já no bordo esquerdo entre 0 a 500 m de largura é observada um rebaixamento bem tímido das leituras de cota, indicando um leve processo erosivo.

6.2.1.2. De 1998 a 2002:

As seções transversais para os anos são apresentadas na Figura 32 e a análise descrita a seguir.

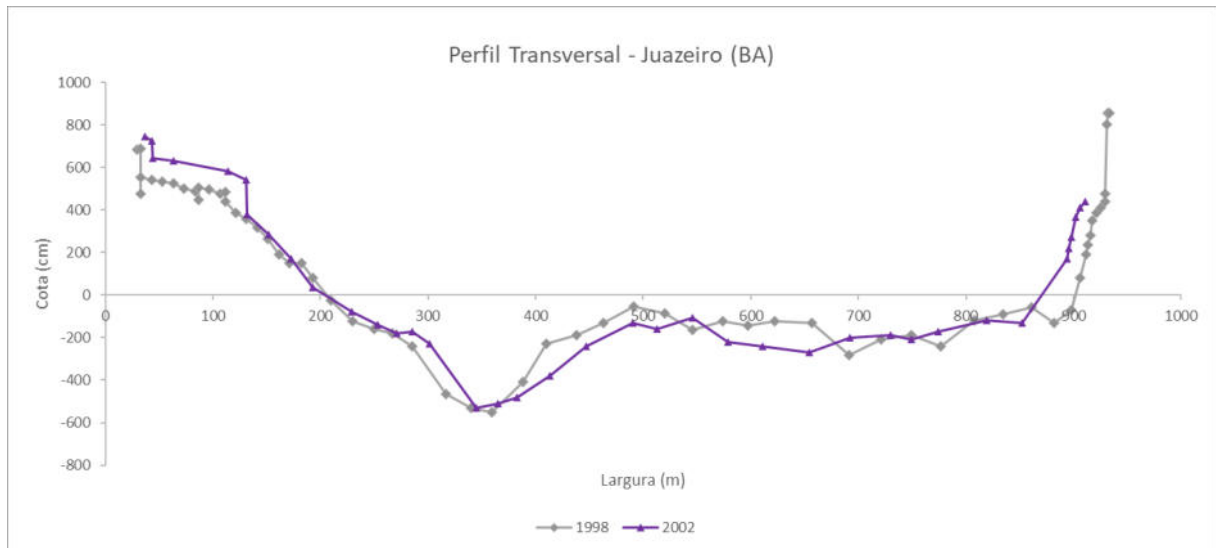


Figura 32 – Seção Transversal 1998 a 2002 - Estação nº 48020000.
Fonte: elaborado pela autora (2024).

- Notou-se a redução das cotas ao longo da extensão do canal, indicando um possível processo erosivo ao longo destes anos.

6.2.1.3. De 2002 a 2012:

As seções transversais para os anos são apresentadas na Figura 33 e a análise descrita a seguir.

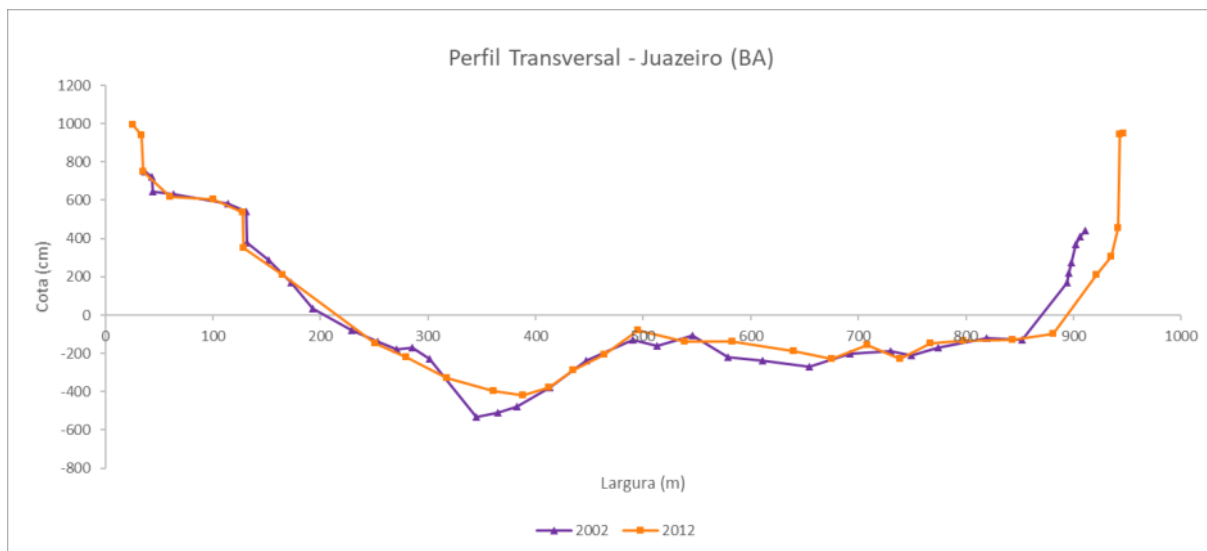


Figura 33 – Seção Transversal 1998 a 2002 - Estação nº 48020000.
Fonte: elaborado pela autora (2024).

- Identificou-se de maneira geral uma elevação das cotas nas regiões centrais, indicando a redução dos processos erosivos na região.
- A extremidade esquerda manteve-se estável sem alterações significativas enquanto a extremidade direita se estendeu por aproximadamente 40 metros.

Essas alterações são atribuídas principalmente às mudanças no regime hidrológico decorrentes da regulação da vazão ao longo dos anos, influenciada por fatores como a gestão das vazões em barragens e as alterações climáticas.

6.2.2. Seção Transversal - Santa Maria da Boa Vista (PE)

A base de dados da ANA disponibilizou seções transversais para esta estação no período de 1980 a 2022. Para facilitar a visualização, também foram selecionadas as seções transversais que apresentaram maiores variações, as quais foram representadas graficamente, conforme ilustrado na Figura 34. Para esta estação

também não foi considerada a seção corresponde ao ano de 2022, por se tratar de dados brutos.

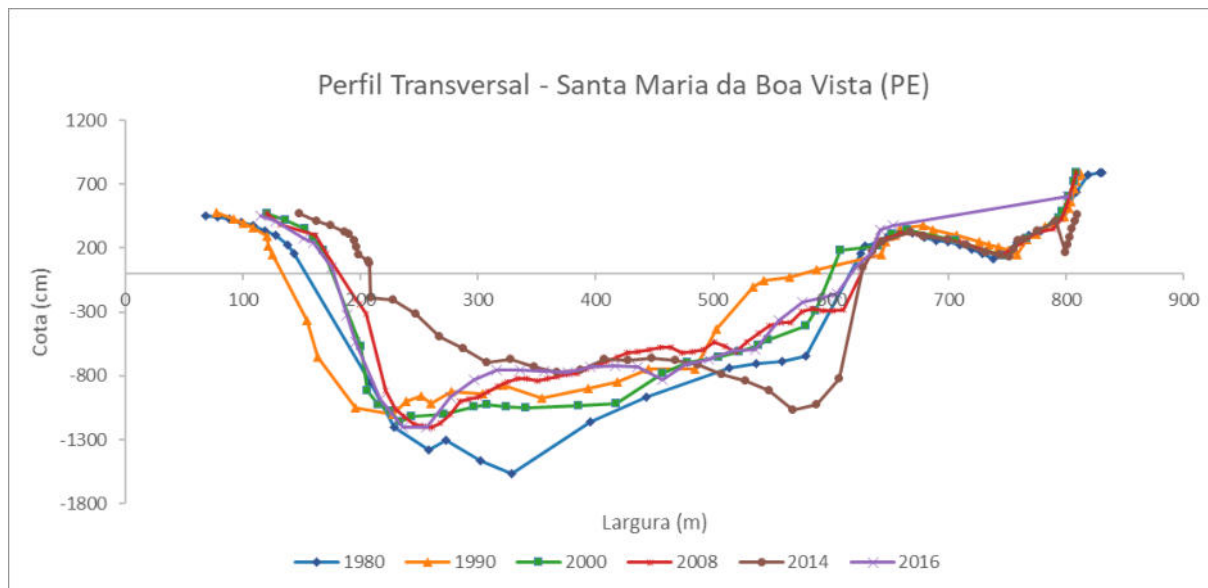


Figura 34 – Seção Transversal - Estação nº 48290000.
Fonte: elaborado pela autora (2024).

De maneira semelhante às seções transversais analisadas para Juazeiro, observa-se na Figura 34 que as extremidades dos perfis ao lado direito permaneceram relativamente estáveis ao longo do período avaliado. Alterações mais significativas também foram registradas nas áreas centrais do canal, especialmente entre 200 m e 700 m de largura e na extremidade esquerda.

Ao longo dos anos, também se identificou padrões de elevação e rebaixamento de cotas em pontos específicos. Por exemplo, em áreas próximas a 200 m e 600 m de largura, há evidências de elevação de cota, também possivelmente atribuídas a processos de sedimentação. Por outro lado, em algumas regiões, o aprofundamento sugere a identificação do processo erosivo.

Para as seções de Santa Maria da Boa Vista também foi realizada uma avaliação mais detalhada das alterações em intervalos de aproximadamente 10 anos, destacando os seguintes períodos:

6.2.2.1. De 1980 a 1990:

As seções transversais para os anos são apresentadas na Figura 35 e a análise descrita a seguir.

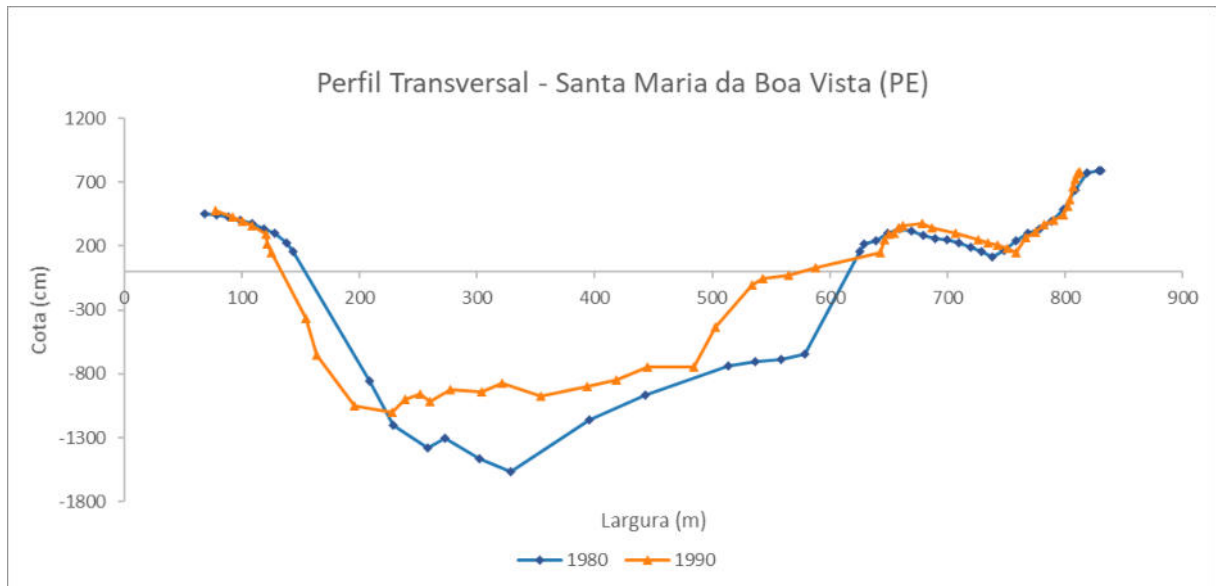


Figura 35 – Seção Transversal 1980 a 1990 - Estação nº 48290000.
Fonte: elaborado pela autora (2024).

- Nota-se ao longo desses 10 anos uma elevação significativa do canal nas áreas centrais, com elevação das cotas ao longo de aproximadamente 200 a 600 m de largura. Esse padrão sugere uma intensificação ou início de um processo de sedimentação ocorrido, muito provavelmente associados a maior fluxo de água e transporte de sedimentos, característico de um canal em regime dinâmico.
- Evidências de processo erosivos também são observadas na extremidade esquerda entre 150 m e 200m de largura.

6.2.2.2. De 2000 a 2008

As seções transversais para os anos são apresentadas na Figura 36, e a análise descrita a seguir.

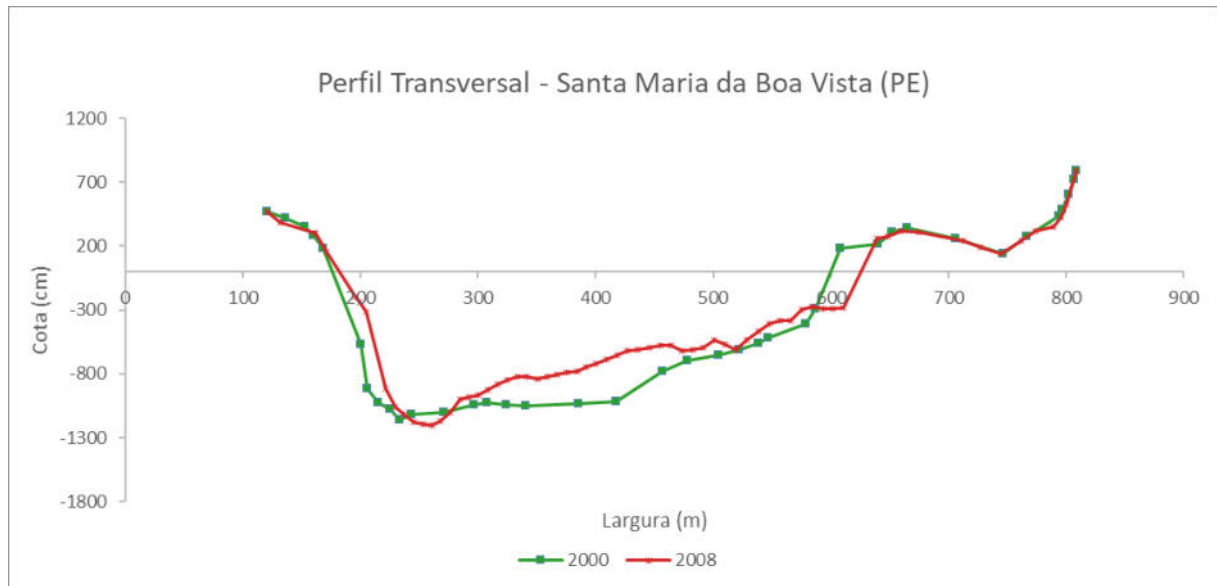


Figura 36 – Seção Transversal 2000 a 2008 - Estação nº 48290000.
Fonte: elaborado pela autora (2024).

- A profundidade máxima no canal central elevou-se consideravelmente, com cotas superiores em comparação ao período anterior, indicando um possível processo de sedimentação ocorrido no rio.
- Há possíveis evidências de processos erosivos no perfil, principalmente em torno de 200 a 300 m a próximo aos 600 m de largura, sugerindo maior intensidade no transporte de sedimentos.
- A sedimentação em algumas regiões próximas ao canal central é menos evidente, indicando predominância de possíveis processos erosivos nesse período.

6.2.2.3. De 2008 a 2014

As seções transversais para os anos são apresentadas na Figura 37 e a análise descrita a seguir.

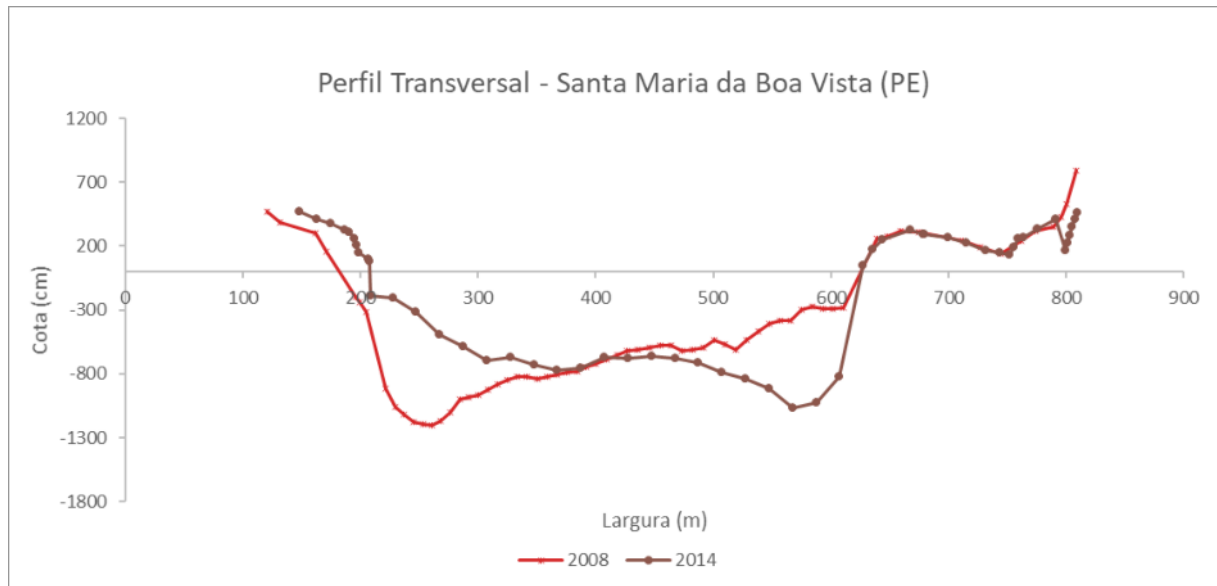


Figura 37 – Seção Transversal 2008 a 2014 - Estação nº 48290000.
Fonte: elaborado pela autora (2024).

- Observa-se um espelhamento dos dados entre os anos analisados, indicando a formação de um processo erosivo entre 400 m e 600 m de largura (no bordo direito) e o acúmulo de sedimentos entre 200 m e 400 m (no bordo esquerdo). No entanto, considerando que a seção de 2016 e demais seções posteriores não apresenta tal inversão, estando essas mais aproximadas da seção transversal de 2008.
- O comportamento anômalo da seção de 2014 pode ser interpretado como consequência de uma inversão nos dados ou de uma alteração no ponto inicial ou de referência utilizado para a medição topobatimétrica do rio. Considerando que, no presente estudo, foram utilizados apenas dados consistentes das seções transversais, é fundamental confirmar essas ocorrências nas estações e investigar possíveis erros associados às leituras topobatimétricas junto aos órgãos responsáveis pelo levantamento e divulgação de dados da mesma, tais como a ANA e o SGB.

6.2.2.4. De 2008 a 2016

As seções transversais para os anos são apresentadas na Figura 38 e a análise descrita a seguir.

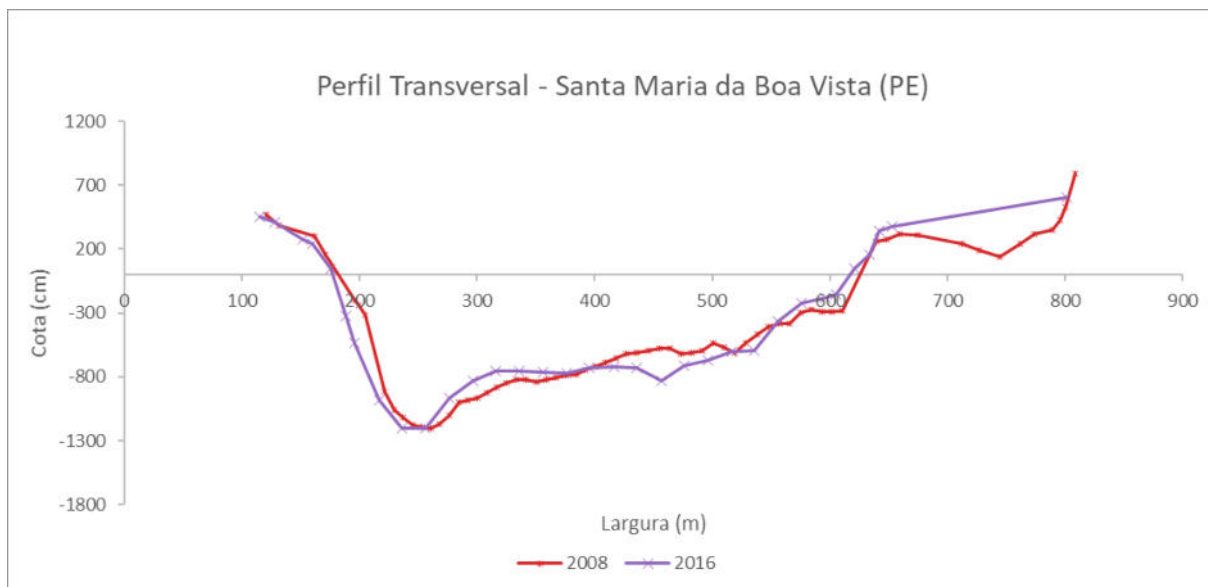


Figura 38 – Seção Transversal 2008 a 2016 - Estação nº 48290000.
Fonte: elaborado pela autora (2024).

- As cotas mostraram maior estabilização em relação ao período anterior, indicando uma diminuição de possíveis processos de erosão e de sedimentação.
- Entre 400 m e 550 m, observa-se um leve acúmulo de sedimentos, sugerindo início de processos de recuperação do canal. Apesar disso, algumas áreas centrais ainda apresentam variações negativas, reforçando o indício de processos erosivos no canal, mas de forma menos acentuada.
- Entre 600 m e 800 m é observado uma elevação das cotas. No entanto, esse comportamento é atribuído ao processo de interpolação gerado pela ausência de pontos aferidos entre essas duas faixas de altitude.

Dessa forma, as seções analisadas evidenciaram a ocorrência de processos erosivos e acúmulo de sedimentos em determinadas regiões. Essas variações podem estar relacionadas a fatores como a gestão do fluxo de vazões, mudanças climáticas e o transporte de sedimentos ao longo dos anos.

6.3. Impactos da Regularização no Meio Urbano

Segundo Pedrosa (2023), a operação dos reservatórios do Rio São Francisco é realizada com base em um conjunto de restrições hidráulicas. Essas restrições incluem a observância de níveis mínimos e máximos de água em pontos ou trechos específicos, bem como limites para vazões máximas e mínimas, visando atender aos múltiplos usos da água na bacia do São Francisco. As restrições são apresentadas na Tabela 15.

Tabela 15 – Restrições do reservatório de Sobradinho

RESTRIÇÕES	CONTROLE DE CHEIAS
• A taxa máxima recomendável de variação de defluência total (vazão turbinada + vazão vertida) é de 1.000 m³/s/dia em condição de controle de cheia e 500 m³/s/dia em condição normal. • As propagações das vazões defluentes de Sobradinho não devem acarretar variações de cota diária superior a 0,50 metro em Juazeiro-BA. • Quando previamente comunicada à CHESFa necessidade de prática da vazão mínima de 1.300 m³/s para a navegação de comboios hidroviários, no trecho entre Sobradinho e o porto de Juazeiro, a CHESF voltará a respeitar esta vazão defluente mínima de 1.300 m³/s apenas durante o tempo necessário à passagem do comboio. • A vazão defluente média mínima diária deve ser 1.300 m³/s para evitar que ocorram problemas na navegação (trecho Sobradinho /Juazeiro), em diversas captações de indústrias, tomadas d'água para abastecimento de cidades e projetos agrícolas localizados no trecho Sobradinho / Itaparica.	• A defluência do reservatório combinada com a vazão incremental não deve ser maior que 8.000 m³/s, em todo o trecho da jusante até a foz. • Identifica-se transbordamento da calha principal para descargas superiores a 6.000 m³/s. Descargas superiores a 7.000 m³/s já acarretam inundações em áreas de agricultura bem como casas e benfeitorias de fazendas. • Havendo indicações de chuvas e vazões incrementais de porte, no trecho da bacia do rio São Francisco compreendido entre os reservatórios de Sobradinho e Luiz Gonzaga, a operação do reservatório de Sobradinho deverá objetivar a mitigação de cheias que estejam ocorrendo a jusante de Sobradinho e/ou Luiz Gonzaga.

Fonte: Pedrosa (2023).

Essa abordagem permite que a operação da usina hidrelétrica seja compatível com atividades essenciais, como captação para abastecimento público, irrigação, navegação, pesca, piscicultura e turismo, garantindo o equilíbrio entre geração de energia e outros interesses socioeconômicos.

De acordo com o Plano Municipal de Saneamento Básico (PMSB) de Juazeiro (2018), o Rio São Francisco desempenhou um papel fundamental na definição do modo de

vida e das atividades produtivas da população do Baixo Médio São Francisco. A construção e operação da Barragem de Sobradinho gerou profundas transformações na estrutura social, política, econômica e cultural da região, impulsionadas principalmente pela expansão das atividades agrícolas irrigadas.

Atualmente região do polo agrícola de Petrolina-Juazeiro, localizada no semiárido brasileiro é a mais desenvolvida do vale do rio São Francisco (ANA, 2021). Na região são localizados ao total sete perímetros de irrigação, que administram a distribuição de água que chega até as lavouras por meio de uma densa infraestrutura de canais, cuja implantação teve início a partir da década de 1960 com a finalidade de desenvolver essa região situada no clima mais seco do Brasil.

Segundo o Atlas da Irrigação (ANA, 2021) a fruticultura é a principal atividade da região (2/3 da área total), com destaque para a uva e a manga, mas a cana-de-açúcar também possui expressiva área irrigada com elevado uso da água, em função da elevada taxa de evapotranspiração e do baixo índice pluviométrico da região.

Segundo o Plano Municipal de Saneamento Básico do município de Juazeiro, entre o reservatório de Sobradinho e Itaparica, encontram-se extensas áreas irrigadas, totalizando aproximadamente 100.000 hectares, com uma vazão estimada de 115 m³/s destinada à irrigação (PMSB,2018).

Além do uso pela irrigação as águas Rio São Francisco são amplamente utilizadas para o abastecimento urbano, rural e industrial, além de outras finalidades como geração de energia, navegação fluvial, pesca, recreação e lazer (PMSB,2018), destacando os usos múltiplos da água na região do semiárido.

A seguir é apresentada a caracterização dos municípios das estações fluviométricas anteriormente estudadas, com o objetivo de analisar suas características socioeconômicas e a necessidade de disponibilidade hídrica para o desenvolvimento dessas regiões.

6.3.1. Município de Juazeiro

Considerada uma capital regional de média influência da Bahia, o município de Juazeiro localiza-se na região norte do estado, a aproximadamente 500 km da capital do estado, Salvador, é o municípios mais populoso da região com uma população estimada de 254.481 habitantes, área de 6.721,237 km² e densidade demográfica de 35,38 hab/km² (IBGE, 2022).

O município é formado por pediplanos sertanejos, várzeas e terraços aluviais. Quanto aos solos, eles variam entre eutróficos, vertissolos, litólicos eutróficos, cambissolo, aluviais, pozólico vermelho - amarelo eutrófico e regossolo distrófico. A geologia identifica os solos de Juazeiro como rochas básicas quartzo biotita, biotita granitos, depósitos aluviais e coluionares. Também há a presença de ultrabásicas anfibiólitos, calcários e depósitos fluviais.

A vegetação da região é coberta por caatinga arborea, com clima semiárido quente (Bhs) com média pluviométrica anual de 425,2 mm e temperatura média anual de 26,0 °C.

O Índice de desenvolvimento humano municipal do município é de 0,677 e Produto Interno Bruto (PIB) per capita de R\$ 20.120,96 (IBGE, 2023). No município, há um total de 40,9 mil empregos formais, sendo que as atividades principais são o cultivo de árvores frutíferas, cultura de cana-de-açúcar, e o comércio varejista, a média salarial desses trabalhadores de R\$ 2,4 mil (CARAVELA, 2023).

A agricultura irrigada e, mais especificamente, a fruticultura irrigada trouxe um aumento significativo na atividade econômica e no desenvolvimento urbano de Juazeiro, tornando-se a região mais próspera do Vale do São Francisco juntamente com a cidade de Petrolina/PE (CORREIA; ARAUJO; CAVALCANTI, 2001)

Conforme supracitado, a área do polo Petrolina-Juazeiro se tornou o principal centro de produção de frutas tropicais no país, com cultivos de destaque de manga, uva, melancia, melão, coco, banana, entre outros. A região é internacionalmente reconhecida pela qualidade dos vinhos produzidos, obtendo um grande aumento na

produção com a implementação de mecanismos de irrigação. Mesmo estando localizada na região do semiárido, a região é a maior exportadora e produtora de frutas do Brasil e a única a colher duas safras de uvas por ano.

6.3.1.1. Demanda Hídrica – Usos Consuntivos

Considerando o polo agrícola da região, foi avaliada a influência da demanda hídrica no consumo urbano/rural e na irrigação para o município de Juazeiro. Nas Figura 39 e Figura 40 são apresentados os gráficos gerados com os dados da (ANA 2021), permitindo uma compreensão mais detalhada das dinâmicas de consumo de água em Juazeiro ao longo dos anos e a estimativa de consumo até 2040.

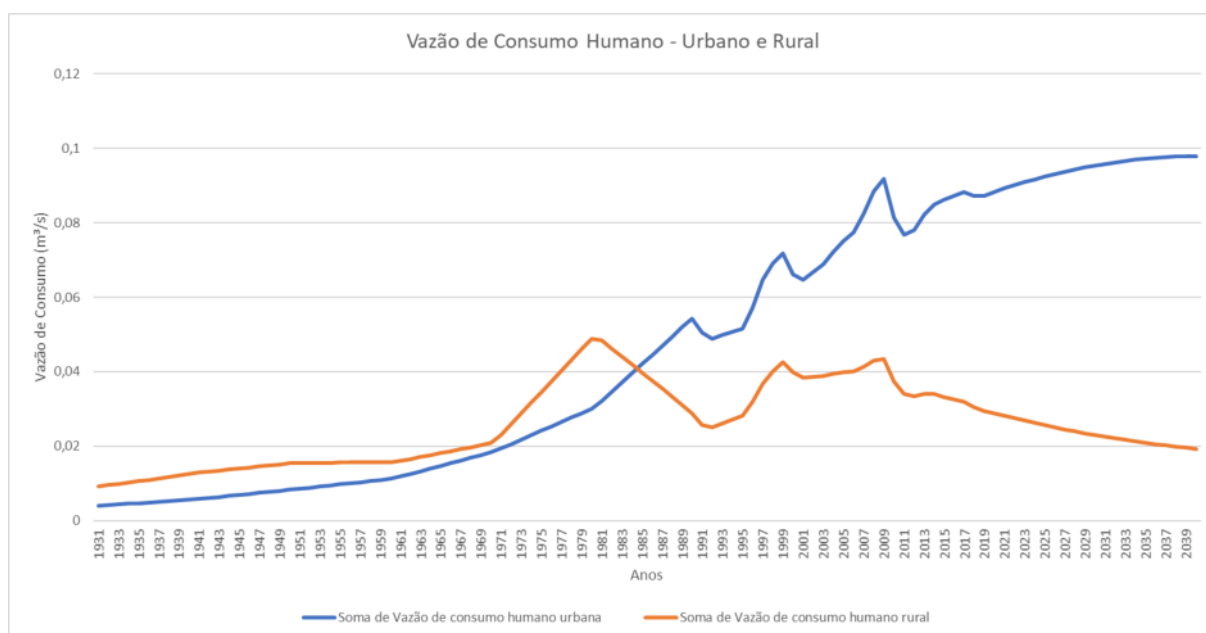


Figura 39 – Vazão de Consumo Humano – Juazeiro
Fonte: elaborado pela autora (2024).

A vazão de consumo diária de água para os usos urbano e rural ao longo do tempo apresentou inversão a partir de 1985, sendo possível perceber um aumento expressivo do consumo urbano a partir desse período, acompanhado por uma redução gradual no consumo rural.

Além do processo de urbanização brasileira, com o êxodo rural ocorrido entre 1960 e 1980, a construção da usina pode também ter impulsionado o processo de migração

os centros. Essas alterações urbanas influenciaram no aumento da demanda hídrica para atender às necessidades da população crescente do município.

Com o gráfico apresentado na Figura 40, é possível perceber o aumento do consumo diário de água para agricultura irrigada a partir de 1979, coincidindo com o início da operação da Usina Hidrelétrica de Sobradinho. Dessa forma, pode-se correlacionar que o desenvolvimento da região foi impulsionado pelo processo de construção da UHE.

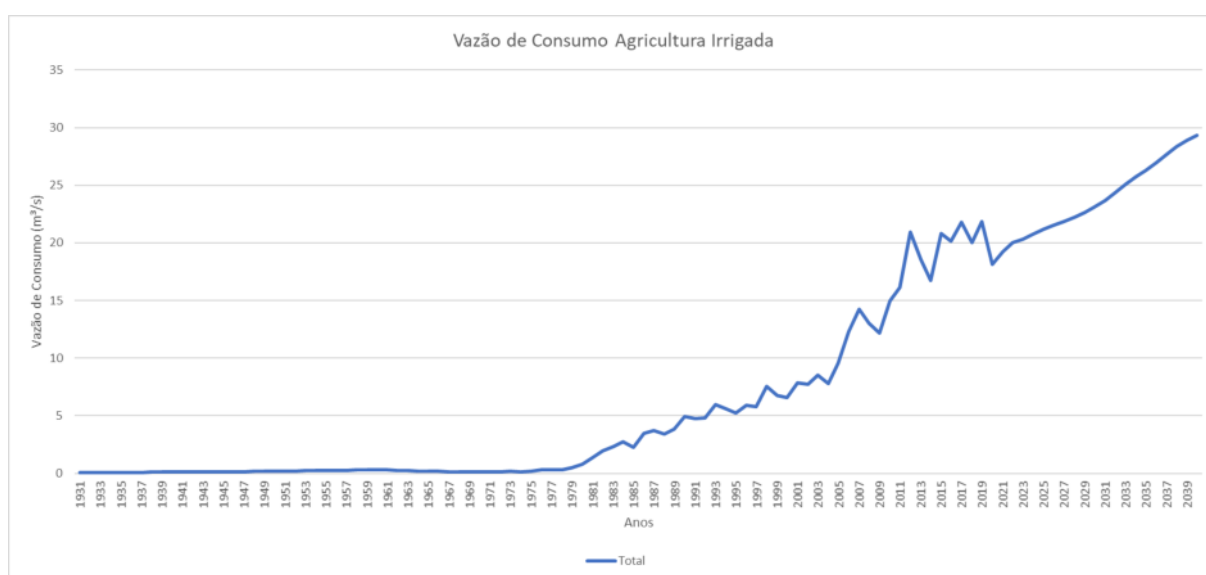


Figura 40 – Vazão de Consumo Irrigação – Juazeiro
Fonte: elaborado pela autora (2024).

6.3.2. Município de Santa Maria da Boa Vista

Localizado ao sudeste do estado de Pernambuco, o município de Santa Maria da Boa Vista fica 640 km da capital do estado, Recife, e faz parte da região administrativa integrada de desenvolvimento do polo Petrolina-Juazeiro, possuindo uma população estimada de 42.682 pessoas, 3.000,774 km² e densidade demográfica de 13,52hab/km² (IBGE, 2023).

O município está inserido na Clima semiárido do tipo BSh, a temperatura média de 28 °C e precipitação média anual de 431,8mm. A vegetação predominante do município é a caatinga Hiperxerófila. Possui relevo suave-ondulado cortado por vales estreitos, com vertentes dissecadas. Os solos que variam entre planossolos, brunos não

cálcicos, podzólicos e litólicos. A geologia identificada no solo de Santa Maria da Boa Vista é constituída pelos litotipos: Gnáissico-migmatítico, Sobradinho-Remanso, e Riacho Seco, dos gnaisses Arapuá, Bangê e Bogó, do Complexo Saúde, dos Granitóides e póstectônicos (CPRM, 2015).

O Índice de desenvolvimento humano municipal do município é de 0,590 e Produto Interno Bruto (PIB) per capita de R\$ 14.056,36 (IBGE, 2023), sendo que 39,4% do valor adicionado advém da agropecuária, na sequência aparecem as participações da administração pública (36,2%), dos serviços (36,2%) e da indústria (4,3%). O município possui 2,3 mil empregos com carteira assinada, com remuneração média de R\$ 2,5 mil, as três atividades que mais empregam são: administração pública em geral, serviços de engenharia e cultivo de uva (CARAVELA, 2023).

6.3.2.1. Demanda Hídrica – Usos Consuntivos

Considerando as características agropecuárias do município a demanda hídrica foi avaliada para o consumo urbano/rural, irrigação e dessedentação animal. Nas Figura 41 e Figura 42 são apresentados os gráficos gerados com os dados da ANA, permitindo uma compreensão mais detalhada das dinâmicas de consumo diário de água em Santa Maria da Boa Vista ao longo dos anos e a projeção de consumo até 2040.

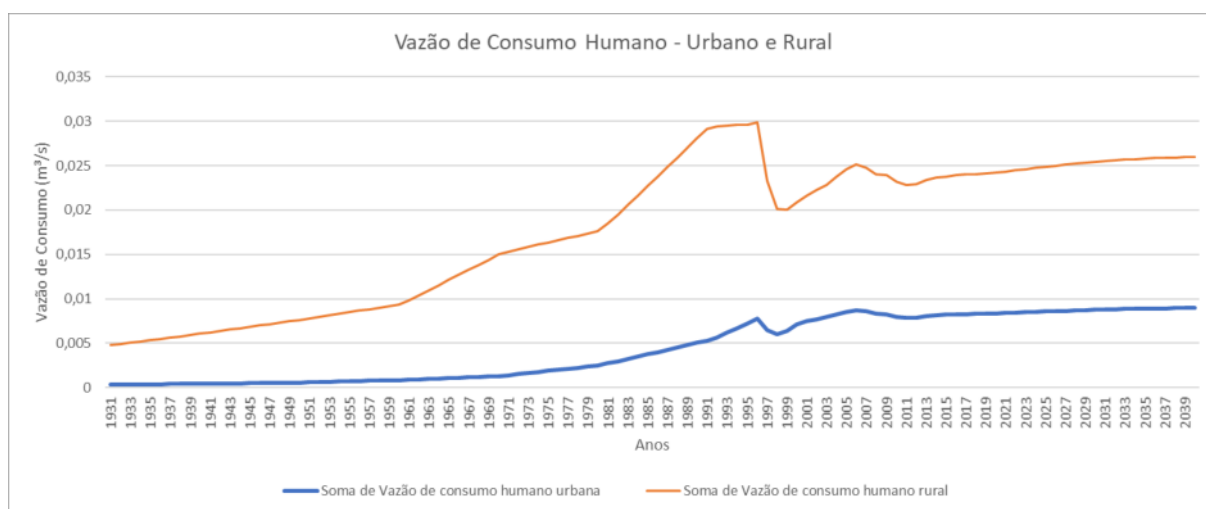


Figura 41 – Vazão de Consumo Humano - Santa Maria da Boa Vista
Fonte: elaborado pela autora (2024).

Diferentemente do município de Juazeiro, Santa Maria da Boa Vista não apresentou uma inversão na vazão consumo de água entre os meios urbano e rural. O gráfico da Figura 41 também indica uma elevação na vazão de consumo de água no meio rural a partir de 1979, possivelmente refletindo a influência da maior disponibilidade hídrica proporcionada pela Usina Hidrelétrica de Sobradinho.

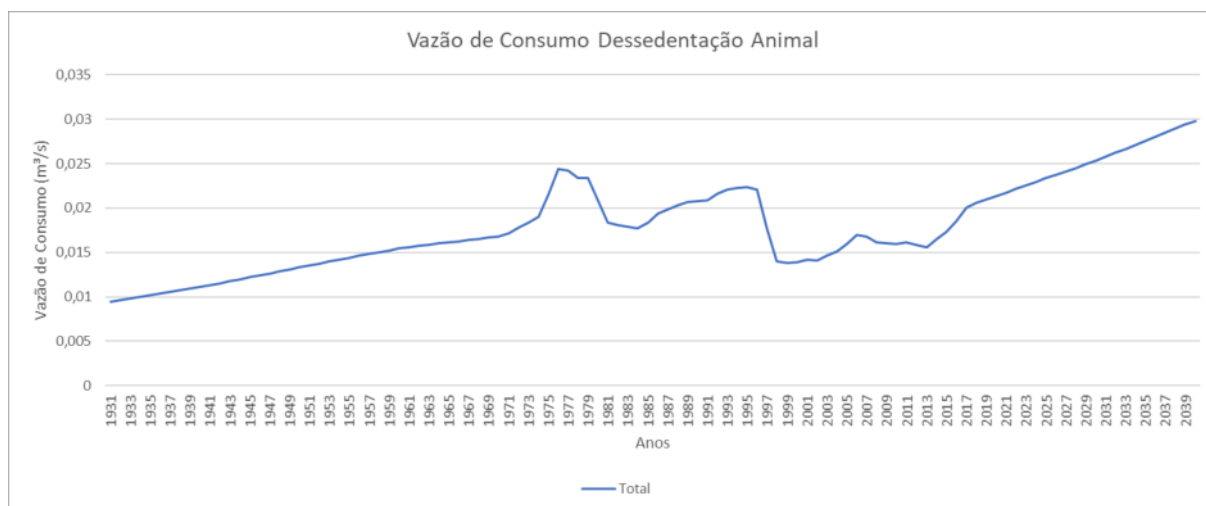


Figura 42 – Vazão de Consumo Dessedentação Animal - Santa Maria da Boa Vista
Fonte: elaborado pela autora (2024).

O gráfico da Figura 42 evidencia um aumento no consumo de água para dessedentação animal a partir de 1974, possivelmente relacionado ao início da construção da Usina Hidrelétrica de Sobradinho, em 1973, que pode ter contribuído para uma maior disponibilidade hídrica. No entanto, o consumo para dessedentação animal apresenta oscilações significativas ao longo dos anos, destacando uma queda acentuada entre 1996 e 2013. Essas variações estão mais relacionadas às dinâmicas agropecuárias do período e não à falta de disponibilidade de água na região.

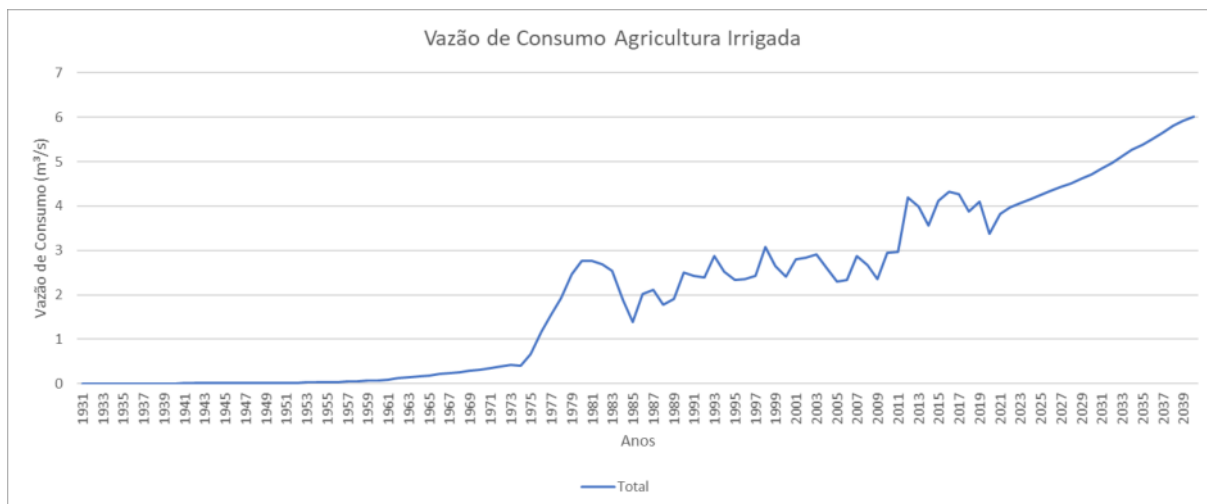


Figura 43 – Vazão de Consumo Irrigação – Santa Maria da Boa Vista
Fonte: elaborado pela autora (2024).

Quanto ao gráfico de irrigação, apresentado na Figura 43, por sua vez, evidencia-se um impulsionamento no consumo de água para a agricultura irrigada a partir de 1973. Esse crescimento pode também estar relacionado ao início da construção da Usina Hidrelétrica de Sobradinho, em 1973, que provavelmente contribuiu para a maior disponibilidade hídrica destinada a essa atividade.

Dessa forma, observa-se que a construção da Usina Hidrelétrica de Sobradinho, além de regularizar os níveis de água na região a jusante e controlar as cheias, também pode ter contribuído para a disponibilidade hídrica de abastecimento e prática agrícola local. Tal disponibilidade trouxe impactos importantes para as dinâmicas urbanas dos municípios supracitados, promovendo avanços nos processos de abastecimento urbano, irrigação e dessedentação animal. Essas transformações impulsionaram um intenso processo de urbanização na região, marcando uma nova etapa de desenvolvimento econômico e social para os municípios do semiárido.

7. CONCLUSÕES

As análises de permanência de cotas e vazões evidenciam que a regularização do regime hídrico do Rio São Francisco, proporcionada pela construção do complexo de Sobradinho, minimizou possíveis efeitos das grandes cheias nos municípios avaliados, Juazeiro (BA) e Santa Maria da Boa Vista (PE), situados a jusante da estrutura. O comportamento hidrológico do rio, considerando os períodos pré e pós-implementação da usina, demonstrou uma redução de 33% nas vazões máximas (Q_5), o que é determinante para a mitigação dos impactos de grandes cheias. Os valores de Q_5 para a estação de Juazeiro foram de 6695,91 para 2218,99 $m^3 s^{-1}$, enquanto para a estação de Santa Maria da Boa Vista foi de 6.421,04 para 4.350,92 $m^3 s^{-1}$.

Entretanto, observou-se uma redução de 1% a 13% nas vazões mínimas (Q_{90} e Q_{95}), o que se mostrou incoerente com o esperado para um sistema cuja operação é realizada por armazenamento. Tal inconsistência foi atribuída a possíveis estratégias de operação da usina hidrelétrica e/ou à divisão dos dados adotada neste trabalho, considerando o período de construção.

De forma geral, os resultados das análises de vazões apresentados para as permanências de Q_{60} a Q_{80} , apresentaram um aumento das vazões e evidenciaram a contribuição do processo de regularização para o abastecimento público, a irrigação e o desenvolvimento socioeconômico da região.

Conclui-se, portanto, que a implementação da Usina Hidrelétrica de Sobradinho atou como um marco no desenvolvimento urbano do polo agrícola de Juazeiro-Petrolina e agropecuário de Santa Maria da Boa Vista. A usina tornou-se um elemento estratégico para a gestão dos recursos hídricos e o desenvolvimento sustentável do semiárido brasileiro.

7.1. Sugestões para trabalhos futuros

Para trabalhos futuros, recomenda-se a realização de novos estudos utilizando as mesmas estações fluviométricas do presente estudo, com a exclusão dos dados de vazão e cota referentes ao período de construção da usina (1973 a 1979)

desprezando assim, as possíveis interferências de vazão durante o período. Dessa forma, recomenda-se que a análise deva considerar como período anterior o intervalo de dados de 1928 até novembro 1979 e o período posterior, os dados partir de dezembro 1979, após o início efetivo da operação da Usina Hidrelétrica de Sobradinho.

Adicionalmente, sugere-se a inclusão de dados das estações para além do ano de 2021, conforme a disponibilidade dos dados consistidos pela ANA no portal Hidroweb. Dessa forma, além de responder à hipótese levantada no presente estudo, o trabalho poderá realizar uma análise mais atualizada e precisa do processo de regularização.

Outro ponto relevante seria a realização de um levantamento das concessões de outorga para fins de abastecimento urbano, rural e de irrigação ao longo dos anos após a construção da usina e a avaliação da consistência da curva-chave das estações fluviométricas, considerando que as vazões mínimas são muito sensíveis a tais modificações.

Segure-se ainda a solicitação de validação e relatório de consistência dos dados disponibilizados no portal Hidroweb junto à ANA e ao SGB.

Por fim, acrescenta-se também a possibilidade de verificação junto à CHESF de possíveis estratégias de operação do reservatório que justifiquem tais resultados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGENDA 21 GLOBAL. UNCED - Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento (1992), **Agenda 21 (global)**. Ministério do Meio Ambiente – MMA. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/se/agen21/ag21global/>>. 14 mar. 2023.

ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Resolução ANA Nº 2.081, de 4 de dezembro de 2017**. Dispõe sobre as condições para a operação do Sistema Hídrico do Rio São Francisco, que compreende os reservatórios de Três Marias, Sobradinho, Itaparica (Luiz Gonzaga), Moxotó, Paulo Afonso I, II, III, IV e Xingó. Disponível em: <<https://www.gov.br/ana/pt-br/legislacao/resolucoes/resolucoes-regulatorias/2017/2081>> Acesso em: 1 jun. 2024.

ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Qualidade de Água em Reservatórios**. Unidade 1: Reservatórios Brasília, DF, 2016. Disponível em: <http://capacitacao.ana.gov.br/conhecerh/bitstream/ana/74/2/Unidade_1.pdf> Acesso em: 10 mar. 2023

ANA -Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **HidroWeb**. Disponível em: <<https://www.snirh.gov.br/hidroweb/apresentacao>>. Acesso em: 1 mar. 2023.

ANA -Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Manual de Usos Consuntivos da Água no Brasil**. Brasília: ANA, 2019. Disponível em: <<http://snirh.gov.br/usos-da-agua/>>. Acesso em: 20 out. 2024.

APARELHOS MEDIR, M. C. E SERVIÇOS. **Molinete Fluviométrico Universal Medir**. Disponível em: <<http://www.aparelhosmedir.com/>>. Acesso em: 1 mar. 2023.
ASA. **ACESSO À ÁGUA PARA POPULAÇÕES DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO - PROPOSTAS DA SOCIEDADE CIVIL**. Disponível em: <chrome-extension://efaidhttps://www.asabrasil.org.br/images/UserFiles/File/Acesso_a_agua_para_populacoes_do_Semiarido_brasileiro.pdf>.

ASFORA, M. C.; CIRILO, J. A. **Reservatórios de regularização: alocação de água para usos múltiplos com diferentes garantias**. v. 2, dez. 2005.

BARBOSA JÚNIOR, A. R. **Elementos de hidrologia aplicada**. São Paulo Editora Blucher, 2022.

BARROS, A. B.; BARROS, A. M. A. **A DIFÍCIL APLICABILIDADE DA POLÍTICA DE ÁGUAS NO BRASIL**. 2009.

BEM. **Balanço Energético Nacional 2022**: Ano base 2021. Empresa de Pesquisa Energética - EPE. Relatório Final. Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-638/BEN2022.pdf>>

BRANCO, O. E. DE A. **Avaliação da disponibilidade hídrica: Conceitos e aplicabilidade**., 2006. Disponível em: <<https://www2.ufjf.br/engsanitariaeambiental/files/2012/04/Disponibilidade-Hídrica.pdf>>

BRASIL, _____. **Lei n. 9.433/1997**. Política Nacional de Recursos Hídricos. Brasília: Secretaria de Recursos Hídricos., 1997. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9433.htm>. Acesso em: 26 fev. 2023

BRASIL. **Lei no 9.984/2000**. Dispõe sobre a criação da Agência Nacional de Águas - ANA, entidade federal de implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e de coordenação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9984.htm>. Acesso em: 26 fev. 2023

BRITO, L. T. DE L.; SILVA, A. DE S.; PORTO, E. R. **Disponibilidade de água e a gestão dos recursos hídricos**. [s.l.] Embrapa Semiárido, 2007.

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, n. 1, p. 71–89, 3 jul. 2018.

CARVALHO, T. M. DE. **Técnicas de Medição de Vazão por Meios Convencionais e Não Convencionais**. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 1, n. 1, p. 73–85, 5 nov. 2008.

CBDB, C. B. DE B. **A História das Barragens no Brasil - Séculos XIX, XX e XXI: cinquenta anos do Comitê Brasileiro de Barragens**. Rio de Janeiro: [s.n.].

CBH-LN, C. DE B. H. DO L. N. Relatório Técnico - **Disponibilidade Hídrica das Bacias Hidrográficas do Litoral Norte (UGRHI 03)**., 2014. Disponível em: <<https://www.sigrh.sp.gov.br/public/uploads/documents/8163/relatorio-tecnico-cbh-ln-criticidade-2014.pdf>>. Acesso em: 7 mares. 2023

CBHSF. **A Bacia**. Disponível em: <<https://cbhsaofrancisco.org.br/a-bacia/>>. Acesso em: 12 mar. 2023.

CHESF – Companhia Hidroelétrica do São Francisco. **Plano de Segurança de Barragens – Volume VII – Plano de Ação de Emergência – PAE - UHE Sobradinho – Barragem de Sobradinho**. Disponível em: <www.chesf.com.br/SistemaChesf/Documents/PAE_EXTERNO_UHE_SOBRADINHO%201.pdf> Acesso em: 18 set. 2024.

CHESF. **Sistema Chesf Sobradinho**. Disponível em: <<https://www.chesf.com.br/SistemaChesf/Pages/SistemaGeracao/Sobradinho.aspx>>. Acesso em: 13 mar. 2024.

CIGB, C. I. DE G. B. **As barragens e a água do mundo: um livro educativo que explica como as barragens ajudam a administrar a água do mundo**. Rio de Janeiro: [s.n.].

COLLISCHONN, B. **Uso de precipitação estimada pelo satélite TRMM em modelo hidrológico distribuído**. 2006.

COLLISCHONN, W. et al. **Em busca do hidrograma ecológico**. 2005.

CONAMA, **Resolução nº 357, de 17 de março de 2005**, do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. (2005). "Classificação de águas, doces, salobras e salinas do Território Nacional". Publicada no Diário Oficial da União (DOU) em 18/03/2005. Brasília, DF. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=459>. Acesso em: 20 de dez 2022.

CPRM. **Projeto Cadastro de Fontes de Abastecimento por Água Subterrânea Pernambuco**. Disponível em: [chrome-extension://efaidhttps://rigeo.cprm.gov.br/bitstream/doc/16866/1/Rel_Santa%20Maria%20da%20Boa%20Vista.pdf](https://rigeo.cprm.gov.br/bitstream/doc/16866/1/Rel_Santa%20Maria%20da%20Boa%20Vista.pdf).

CRAIG, J. **Large Dams and Freshwater Fish Biodiversity**. 1 jan. 2000.

CRUZ, J.; TUCCI, C. Estimativa da Disponibilidade Hídrica Através da Curva de Permanência. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 13, n. 1, p. 111–124, 2008.

CUNHA, C. DE J. **REGULARIZAÇÃO DA VAZÃO E SUSTENTABILIDADE DE AGROECOSSISTEMAS NO ESTUÁRIO DO RIO SÃO FRANCISCO**. Fortaleza - CE, 2015. Disponível em: [chrome-extension://efaidnhttps://www.uece.br/propgeowp/wp-content/uploads/sites/60/2013/06/cleidinilsonde_jesus_cunha1.pdf](https://www.uece.br/propgeowp/wp-content/uploads/sites/60/2013/06/cleidinilsonde_jesus_cunha1.pdf)

CNRH. CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS. **Resolução nº 32, de 15 de outubro de 2003 - Institui a Divisão Hidrográfica Nacional**. Resolução CNRH nº 30, de 11 de dezembro de 2002 - Define metodologia para codificação de bacias hidrográficas, no âmbito nacional. Disponível em: <https://www.ceivap.org.br/ligislacao/Resolucoes-CNRH/Resolucao-CNRH%2032.pdf> Acesso em: 20 de dez 2022.

DELMEE, G. J. **Manual de medição de vazão**. 3a ed. [s.l.] Editora Blucher, 2003.

FELIPPE et al. **Uso de técnicas de sensoriamento remoto na análise da dinâmica morfológica da foz do rio São Francisco no período de 1979 a 2008**. Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, 2009, INPE, p. 3737-3744.

FERREIRA, M. I. P.; SILVA, J. A. F. DA; PINHEIRO, M. R. DE C. **Recursos hídricos: água no mundo, no Brasil e no Estado do Rio de Janeiro**. Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego, v. 2, n. 2, p. 29–36, 2008.

GAMARO, P. E. M. **Medidores Acústico Doppler de Vazão**. Assessoria de comunicação social, Itaipu Binacional., 2012.

GENZ, F. **Avaliação dos Efeitos da Barragem Pedra do Cavalo Sobre a Circulação Estuarina do Rio Paraguaçu e Baía de Iguape**. Tese de Doutorado. Universidade Federal da Bahia, Brasil, 2006. 245p.

GUIMARÃES, V. S. **Manual Técnico sobre Medição de Descarga Líquida em Grandes Rios**. [s.l: s.n.].

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo demográfico 2010: características da população e dos domicílios - resultado do universo**. Rio de Janeiro: IBGE, 2011.

IPEA. ODS 6 - Água Potável e Saneamento - Ipea - Objetivos do Desenvolvimento Sustentável. 2019 Disponível em: <<https://www.ipea.gov.br/ods/ods6.html>>. Acesso em: 14 mar. 2023.

LI, Y. P.; HUANG, G. H.; NIE, S. L. **Planning water resources management systems using a fuzzy-boundary interval-stochastic programming method**. *Advances in Water Resources*, v. 33, p. 1105–1117, 2010.

MACEDO, M. **Rio São Francisco**. Disponível em: <<https://www.educamaisbrasil.com.br/enem/geografia/rio-sao-francisco>>. Acesso em: 12 mar. 2023.

MARTINS, D. DE M. F. et al. 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, p. 1054–1061, out. 2011.

MDR. **Meio Ambiente Preservado**. Publicado em 05/08/2020. Atualizado em 23/10/2024. Disponível em: <<https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/seguranca-hidrica/projeto-sao-francisco/meio-ambiente-preservado>>. Acesso em: 1 dez. 2024.

MEDEIROS, P. R. P. et al. **APORTE FLUVIAL E DISPERSÃO DE MATÉRIA PARTICULADA EM SUSPENSÃO NA ZONA COSTEIRA DO RIO SÃO FRANCISCO (SE/AL)**. *Geochimica Brasiliensis*, v. 21, n. 2, p. 212–231, 9 fev. 2017.

MENDIGUCHÍA, C. et al. **Using chemometric tools to assess anthropogenic effects in river water: A case study: Guadalquivir River (Spain)**. *Analytica Chimica Acta, Papers presented at the 5th COLLOQUIUM CHEMIOMETRICUM MEDITERRANEUM*. v. 515, n. 1, p. 143–149, 5 jul. 2004.

Microsoft Excel. Versão Office Mondo. 2111 Microsoft Corporation.2016.

Minitab 19 Statistical Software. Versão 19 Minitab, LLC. 2019

MOURA, M. S. B. **Precipitação e evaporação** - Portal Embrapa. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/bioma-caatinga/clima/precipitacao-e-evaporacao>>. Acesso em: 8 mar. 2023.

NAGHETTINI, M. **Introdução à Hidrologia Aplicada**. Belo Horizonte: Escola de Engenharia UFMG, 2012.

NASCIMENTO DO VASCO, A.; NETTO, A. DE O. A.; PRUSKI, F. F. **Impactos das barragens na disponibilidade hídrica do Nordeste do Brasil**. *Revista Recursos Hídricos*, v. 38, n. 2, p. 39–49, dez. 2017.

NOBRE, C. et al. **Land-use and climate change risks in the Amazon and the need of a novel sustainable development paradigm**. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 113, 16 set. 2016.

NUNES, A.; PRUSKI, F. **The effect of reservoirs on water availability.** *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 20, n. 1, p. 7–15, 2015.

NUNES, M. A. **A importância de reservatório de regularização de vazão e seus impactos na geração de energia. Estudo de Caso: UHE Bocaina na Bacia do Rio Paranaíba.** Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: <<http://repositorio.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10030314.pdf>>

OLIVEIRA, A. C. M.; GOMES, C. C. **ESTUDOS DOS IMPACTOS AMBIENTAIS NO ORÇAMENTO DE BARRAGENS.** Disponível em: <<https://www.abrhidro.org.br/SGCv3/publicacao.php?PUB=3&ID=110&SUMARIO=1651>>. Acesso em: 8 mar. 2023.

OLIVEIRA, A. M. **Estudo Hidrodinâmico-Sedimentológico do Baixo São Francisco, Estuário e Zona Costeira Adjacente (AL/SE).** Projeto GEF São Francisco (ANA/ GEF/ PNUMA /OEA). UFAL, 2003. 81 p. (Relatório Final).

OLIVEIRA, N. C. C. DE. **A grande aceleração e a construção de barragens hidrelétricas no Brasil.** *Varia História*, v. 34, n. 65, p. 315–346, ago. 2018.

PEDROSA, V. **Operação Hidráulica dos Reservatórios do Rio São Francisco.** Para entender os serviços prestados pelos reservatórios e o uso múltiplo das águas. Maceió. Ed. do Autor, 2023. ISBN: 978-65-00-67715-7.

Peixoto, L. S.; Mauad, F. F. Estudo de conflitos de usos múltiplos da água utilizando simulação computacional. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v.8, p.209215, 2003.

PEREIRA, M. A. F. et al. **Importância do monitoramento e disponibilização de dados hidrológicos para a gestão integrada dos recursos hídricos.** *Sociedade & Natureza*, v. 32, p. 292–303, 2020.

PEREIRA, V. R.; RODRIGUEZ, D. A. **Vulnerabilidades da segurança hídrica no Brasil frente às mudanças climáticas.** *Derbyana*, v. 43, p. e777–e777, 29 dez. 2022.

PERILLO JÚNIOR, M. F.; VILELA, L. M.; NETO, B. DE G. **Manual Técnico de Outorga.** 2012.

PIMENTEL, L. **Hidrologia - Engenharia e Meio Ambiente.** [s.l.] Grupo GEN, 2015.

PINHEIRO, Lidriana de Souza; MORAIS, J. O. **Interferências de barramentos no regime hidrológico do estuário do rio Catú-Ceará-Nordeste do Brasil.** *Sociedade & natureza (UFU. Online)*, v. 22, p. 237-250, 2010.

PINTO, N. L. DE S. et al. **Hidrologia básica.** Editora Edgard Blucher: [s.n.].

PNQA. **Indicadores de Qualidade – Índice de Qualidade das Águas (IQA).** 2023a. Disponível em: < <http://pnqa.ana.gov.br/indicadores-indice-aguas.aspx#>>. Acesso em: 14 mar. 2023.

PNQA. **Portal da Qualidade das Águas.** 2023b disponível em: <<http://pnqa.ana.gov.br/Qualiagua.aspx>>. Acesso em: 10 mar. 2023.

RAHMAN M. H. et al. **Salinity impacts on agro-biodiversity in three coastal, rural villages of Bangladesh.** Ocean & Coastal Management, 54 (2011) 455 e 468.

REZENDE, E. F. S. M. et al. **Análise do impacto da construção da usina hidrelétrica de Xingó no regime de vazões do Rio São Francisco.** XV-SRHNE0169. XV SRHNE - SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE. ISSN: 2359-1900. Disponível em: < <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=6915>> Acesso em: 14 mai. 2024.

RIBEIRO, R. B. **Critérios de valoração do uso da água considerando o manancial de captação subterrâneo e a regularização de vazões.** 22 fev. 2016.

RIOS, F. P. et al. **ESTUDO COMPARATIVO ENTRE MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE VAZÃO EM CURSOS D'ÁGUA.** Anais ABRHidro. Disponível em: <https://www.abrhidro.org.br/SGCv3/publicacao.php?PUB=3&ID=81&SUMARIO=1423&ST=estudo_comparativo_entre_metodos_de_medicao_de_vazao_em_cursos_d_agua>. Acesso em: 25 fev. 2023.

RODRIGUES, S. A.; BATISTELA, G. C. **UMA REVISÃO SOBRE A DISPONIBILIDADE HÍDRICA BRASILEIRA PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA** Geoambiente On-line, n. 21, 31 dez. 2013.

RODRIGUEZ, R. DEL G. **Metodologia para a estimativa das demandas e disponibilidades hídricas: estudo de caso da bacia do Paracatu.** 26 fev. 2004.

SANTOS, A. L. R. D. S. et al. **ANÁLISE DO IMPACTO DA CONSTRUÇÃO DA USINA HIDRELÉTRICA DE XINGÓ NO REGIME DE VAZÕES DO RIO SÃO FRANCISCO.** Disponível em: <<https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=6915>>. Acesso em: 8 fev. 2023.

SANTOS, H. et al. **Alterações hidrológicas a jusante de uma hidrelétrica: efeitos ecológicos e proposições.** CEMIG. Belo Horizonte: ISBN 978-65-88694-00-8 DOI: 10.5935/VIII.2020B001. 2020.

SANTOS, W.A. **A BARRAGEM DE XINGÓ E OS IMPACTOS SOCIOAMBIENTAIS NO BAIXO SÃO FRANCISCO SERGIPANO.** Programa de Pós-Graduação em Geografia. Sergipe, 2019. Disponível em: <https://ri.ufs.br/bitstream/riufs/14369/2/WESLEY_ALVES_SANTOS.pdf>. Acesso em: 8 fev. 2024.

SCHNEIDER, V. E. et al. **Avaliação da qualidade da água antes e durante a implantação de uma PCH.** 5o Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente, 2016.

SILVA, D. F.; GALVÍNCIO, J. D.; ALMEIDA, H. R. R. DE C. **VARIABILIDADE DA QUALIDADE DE ÁGUA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO E ATIVIDADES ANTRÓPICAS RELACIONADAS.** Disponível em: <<https://silo.tips/download/variabilidade-da-qualidade-de-agua-na-bacia-hidrografica-do-rio-sao-francisco-e>>. Acesso em: 8 mar. 2023.

SILVA, T. A.; COSTA, C. T. F. **Estudo Comparativo da Aplicação de Métodos de Hidromedição Em Uma Seção do Rio Carás na Sub-Bacia Hidrográfica do Rio**

Salgado, Crato / CE. Disponível em: <<https://www.abrhidro.org.br/SGCv3/publicacao.php?PUB=3&ID=81&SUMARIO=1420>>. Acesso em: 27 fev. 2023.

SOUSA, F. J. **A CONSTRUÇÃO DA USINA HIDRELÉTRICA DE SOBRADINHO | ÁGUA, VIDA & CIA.** Disponível em: <<https://ferdinandodesousa.com/2017/06/05/a-construcao-da-usina-hidreletrica-de-sobradinho/>>. Acesso em: 15 fev. 2023.

SOUSA, R. **Rio São Francisco: características, afluentes e transposição.** Disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/brasil/rio-sao-francisco.htm>>. Acesso em: 12 mar. 2023.

SOUZA, R. A. DE et al. **The importance of reservoir regularization in the Brazilian electric system; A importancia dos reservatorios de regularizacao no sistema eletrico brasileiro.** 1 jul. 2010.

SUASSUNA, J. **Represa de Sobradinho: um reservatório estratégico e desconhecido** - Reporter Brasil 2008 Disponível em: <<https://reporterbrasil.org.br/2008/05/represa-de-sobradinho-um-reservatorio-estrategico-e-desconhecido/>> Acesso em: 13 nov. 2024.

TUCCI, C. E. M.; HESPANHOL, I.; NETTO, O. DE M. C. **Gestão da Água no Brasil.** Brasília: UNESCO, 2001.

VIVA O SERTÃO. **Usina Hidrelétrica de Sobradinho** – Viva o Sertão., 2014. Disponível em: <<https://vivaosertao.com.br/usina-hidreletrica-de-sobradinho/>>. Acesso em: 12 mar. 2023

WMO, W. M. O. **Guide to Hydrological Practices.** [s.l: s.n.]. v. I

WWF Brasil. **Dia Mundial da Água.** Disponível em: <https://www.wwf.org.br/natureza_brasileira/areas_prioritarias/pantanal/dia_da_agua/>. Acesso em: 26 fev. 2023.