



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ARIANE SILVA CARDOSO

**MODELAGEM QUALI-QUANTITATIVA DA ÁGUA NO EIXO LESTE DO
PROJETO DE INTEGRAÇÃO DO RIO SÃO FRANCISCO: o caso do Alto Curso do
rio Paraíba**

Recife

2022

ARIANE SILVA CARDOSO

**MODELAGEM QUALI-QUANTITATIVA DA ÁGUA NO EIXO LESTE DO
PROJETO DE INTEGRAÇÃO DO RIO SÃO FRANCISCO: o caso do Alto Curso do
rio Paraíba**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Área de concentração: Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Maria do Carmo Martins Sobral

Coorientador: Prof. Dr. Arisvaldo Vieira Mélo Junior

Recife

2022

Catálogo na fonte
Bibliotecária Maria Luiza de Moura Ferreira, CRB-4 / 1469

- C268m Cardoso, Ariane Silva.
Modelagem quali-quantitativa da água no eixo leste do projeto de integração do Rio São Francisco: o caso do Alto Curso do Rio Paraíba / Ariane Silva Cardoso. - 2022.
198 folhas, il.; tab., abr. e sigl.
- Orientadora: Profa. Dra. Maria do Carmo Martins Sobral.
Coorientador: Prof. Dr. Arisvaldo Vieira Mélo Junior.
- Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2022.
Inclui Referências e Apêndice.
1. Engenharia Civil. 2. Alocação de água. 3. Qualidade da água. 4. Semiárido. 5. Gestão sustentável da água. I. Sobral, Maria do Carmo Martins (Orientadora). II. Mélo Junior, Arisvaldo Vieira (Coorientador). III. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG/2022-307

ARIANE SILVA CARDOSO

**MODELAGEM QUALI-QUANTITATIVA DA ÁGUA NO EIXO LESTE DO PROJETO
DE INTEGRAÇÃO DO RIO SÃO FRANCISCO: O CASO DO ALTO
CURSO DO RIO PARAÍBA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito para obtenção do título de Doutora em Engenharia Civil, Área de Concentração Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Aprovada em 17/05/2022

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Maria do Carmo Martins Sobral - UFPE

Coorientador: Prof. Dr. Arisvaldo Vieira Mello Junior - USP

BANCA EXAMINADORA

participação por videoconferência

Prof.^a Dr.^a Maristela Casé Costa Cunha (examinadora externa)
Universidade do Estado da Bahia

participação por videoconferência

Dr. Gilberto Queiroz de Lima Júnior (examinador externo)
Agência Pernambucana de Águas e Climas

participação por videoconferência

Dr.^a Érika Alves Tavares Marques (examinadora externa)
Universidade Federal de Pernambuco

participação por videoconferência

Prof. Dr. Fabricio Motteran (examinador externo)
Universidade Federal de Pernambuco

participação por videoconferência

Prof. Dr. Wanderli Rogério Moreira Leite (examinador interno)
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente a Deus, por me proporcionar saúde, sempre guiando meus passos, permitindo a oportunidade de vivenciar novas conquistas e a felicidade de compartilhá-las com as pessoas que amo.

À minha família, onde sempre encontro conforto e amor, meus pais Jozete e Renildo, minha irmã Mariane, meu esposo Anthony e meu filho Arthur, que são alicerces no meu dia a dia e estão comigo em todas as conquistas e dificuldades.

À família que ganhei de presente, meus sogros Tereza e Antônio, a vó Marluce, e todos os primos, primas, tios e tios, agradeço o carinho e companheirismo.

À minha orientadora prof.^a Maria do Carmo Sobral, a quem tenho muita admiração, respeito e carinho, sempre acolhendo e direcionando, com tanta dedicação.

À prof.^a Maristela Casé, a quem sou eternamente grata e tenho imenso carinho, e que me acompanha há 15 anos nesse processo de aprendizado. Obrigada pela amizade, lições e confiança.

Ao meu coorientador prof. Arisvaldo Mélo Junior, a quem tenho admiração e gratidão, por todo acolhimento e apoio, pela oportunidade de trabalharmos juntos, conhecimento compartilhado e paciência.

A todos os integrantes do Grupo de Gestão Ambiental (GGA), meus queridos companheiros nessa caminhada: Cláudia Oliveira, Érika Marques, Gérsica Nogueira, Janaina Assis, Hidaiane Caldas, Joelma Ferreira, Camylla Rebeca, Tatyane Guimarães, Mayara Melo, Renata Caminha, Oziel Alcântara, Athos Farias e todos os outros que já passaram neste grupo. E, a minha querida amiga/irmã de todas as horas, Jucélia Tavares.

Aos membros da banca examinadora, Dr. Wanderli Leite, Dr.^a Maristela Casé, Dr.^a Érika Marques, Dr. Fabrício Motteran e Dr. Gilberto Queiroz, pela colaboração no enriquecimento desta tese.

À Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), por todo o conhecimento construído, e as queridas secretárias, por toda constante assistência.

Ao Ministério do Desenvolvimento Regional (ex Ministério da Integração Nacional), por disponibilizar os dados de qualidade da água.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoa de Nível Superior – Brasil (CAPES), pelo apoio concedido através da bolsa de pesquisa (Código de Financiamento 001).

Ao grupos de pesquisa: NUPEA (UNEB *Campus VIII*) e LABSID (USP).

A todos aqueles que direta ou indiretamente cooperaram para o desenvolvimento desta tese, minha imensa gratidão.

RESUMO

Os recursos hídricos se apresentam de maneira crítica quali-quantitativamente no Brasil, sobretudo no semiárido nordestino, região de disponibilidade hídrica irregular e escassez de água. Para minimizar os problemas derivados da escassez hídrica e garantir o abastecimento público no semiárido, vem sendo desenvolvido o Projeto de Integração do Rio São Francisco (PISF). Com objetivo de atender a 12 milhões de pessoas em Pernambuco, Ceará, Rio Grande do Norte e Paraíba, transferindo águas do rio São Francisco para outras bacias nesses estados. A gestão sustentável dessas águas será primordial para garantia dos seus usos. Para tal, esta pesquisa teve como objetivo avaliar a qualidade das águas e suas demandas, com intuito de auxiliar na gestão dos recursos hídricos no Alto Curso do rio Paraíba (PB), Eixo Leste do PISF. A avaliação da qualidade da água se deu a partir do monitoramento de 12 parâmetros físico-químicos e biológicos, entre 2009 e 2019, e os usos múltiplos, por meio da análise das outorgas emitidas para os reservatórios Poções e Eptácio Pessoa, em 2019. Simulações quali-quantitativas da água foram realizadas considerando presença e ausência das águas do PISF, a partir da aplicação do modelo AcquaNet. As principais demandas de água outorgadas identificadas foram, no reservatório Poções, o abastecimento público (1), e no reservatório Eptácio Pessoa, o abastecimento público (1) e a irrigação (583). Os parâmetros fósforo, sólidos dissolvidos totais e demanda bioquímica de oxigênio (DBO) excederam os limites recomendados pela Resolução Conama 357/05, classe 2, na maior parte do monitoramento. O IQA, foi mais expressivo nas classificações boa (55%) e regular (30%) e o IET, entre eutrófico (31%) e mesotrófico (22%). Foram observadas florações de Cyanobacteria, com ocorrência de espécies potencialmente tóxicas, e dinoflagelados invasor após chegada das águas do PISF. Os cenários de alocação de água mostraram déficits no atendimento ao abastecimento público e a irrigação, nas simulações com e sem as águas do PISF. Porém, nos cenários com águas do PISF, ou quando este entregou maior vazão, estes déficits foram reduzidos. Nos cenários de qualidade da água, com águas do PISF, as concentrações de oxigênio dissolvido, DBO, fósforo e nitrogênio tenderam a reduzir, estabilizar-se ou a manter, por maior período, com resultados dentro dos limites preconizados pela legislação, mas nem sempre foi suficiente para melhorar a qualidade da água. Os resultados desta pesquisa trazem informações que subsidiam a tomada de decisão para gestão sustentável da água e garantia do abastecimento público, contribuindo com a melhoria da qualidade de vida da população beneficiária.

Palavras-chave: alocação de água; qualidade da água; semiárido; gestão sustentável da água.

ABSTRACT

The water resources are presented in a critical qualitative and quantitative way in Brazil, especially in the northeastern semi-arid region, a region of irregular water availability and water scarcity. To minimize the problems of public hydraulic problems and guarantee the supply in the semiarid region, the São Francisco River Integration Project (PISF) has been developed. With the objective of serving 12 million people in Pernambuco, Ceará, Rio Grande do Norte and Paraíba, transferring water from the São Francisco river to other basins in these states. The sustainable management of these waters will be essential to guarantee their uses. To this end, this study aimed to evaluate the quality of water and its demands, in order to assist in the management of water resources in the Upper Paraíba river Course (PB), East Axis of the PISF. The assessment of water quality was carried out through the analysis of the monitoring of the 12 physical-chemical and biological parameters, between 2009 and 2019, and multiple uses, through the analysis of the grants issued for the Poções and Epitácio Pessoa reservoirs, in 2019. Simulations quali-quantitative measurements of water were carried out considering the presence and absence of water from the PISF, based on the application of the AcquaNet model. The main water demands identified in the Poções reservoir were public supply (1), and in the Epitácio Pessoa reservoir, public supply (1) and irrigation (583). The phosphorus, total dissolved solids and biochemical oxygen demand (BOD) parameters exceeded the limits recommended by Conama Resolution 357/05, Class 2, in most of the monitoring. The WQI was more expressive in the good (55%) and regular (30%) classifications, and the ETI, between eutrophic (31%) and mesotrophic (22%). Cyanobacteria blooms, with the occurrence of potentially toxic species, and invasive dinoflagellates were observed after the arrival of the PISF waters. The water allocation scenarios showed deficits in public supply and irrigation, in the simulations with and without PISF water. However, in scenarios with PISF water, or when it delivered a higher flow, these deficits were reduced. In the water quality scenarios, with PISF waters, the concentrations of dissolved oxygen, BOD, phosphorus and nitrogen tended to reduce, stabilize or maintain for a longer period, with results within the limits recommended by the legislation, but not always was enough to improve water quality. The results of this research provide information that support decision-making for sustainable water management and guarantee of public supply, contributing to an improvement in the quality of life of the beneficiary population.

Keywords: water allocation; water quality; semiarid; sustainable water management.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Modelo do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH) no Brasil	28
Figura 2 -	Demanda de água por região geográfica no Brasil	31
Figura 3 -	Demandas de retirada de água nas Regiões Hidrográfica Nordeste Oriental e do São Francisco	35
Figura 4 -	Infraestrutura hídrica do Estado da Paraíba e do Projeto de Integração do Rio São Francisco com as bacias do Nordeste Setentrional	44
Figura 5 -	Diagrama unifilar da infraestrutura do PISF nos Eixos Norte e Leste, com sistema dos novos reservatórios	44
Figura 6 -	Arquitetura do AcquaNet e as principais funcionalidades de seus módulos de análise	53
Figura 7 -	Localização geográfica da bacia hidrográfica do rio Paraíba/PB	57
Figura 8 -	Mapa de localização do Eixo Leste do Projeto de Integração do Rio São Francisco com Bacias do Nordeste Setentrional	58
Figura 9 -	Registro fotográfico do reservatório Poções no município de Monteiro/PB, em 2018	61
Figura 10 -	Registro fotográfico do reservatório Camalaú no município de Camalaú/PB, em 2018	61
Figura 11 -	Registro fotográfico do reservatório Epitácio Pessoa no município de Boqueirão/PB, em 2018	62
Figura 12 -	Fluxograma metodológico das etapas realizadas neste capítulo	63
Figura 13 -	Localização dos pontos de amostragem do monitoramento da qualidade da água do PISF	66
Figura 14 -	Curvas cota-área-volume dos reservatórios: 4 A. - Poções; 4 B. – Camalaú; 4 C. - Epitácio Pessoa	73
Figura 15 -	Evaporação média mensal nos reservatórios Poções, Camalaú e Epitácio Pessoa	73
Figura 16 -	Postos fluviométricos e reservatórios do sistema hídrico do Alto Curso do Rio Paraíba	75
Figura 17 -	Relação entre área de drenagem e vazão específica dos postos Caraúbas, Poço de Pedras e Bodocongó	76
Figura 18 -	Rede AcquaNet do Alto Curso do rio Paraíba	77

Figura 19 - Diagrama unifilar da área de estudo	78
Figura 20 - Volume (m ³) mensal do reservatório Poções no período de janeiro/2009 a dezembro/2019; P = Início da operação do PISF	93
Figura 21 - Registro fotográfico do reservatório Poções e áreas de agricultura irrigada à direita	93
Figura 22 - Localização das outorgas emitidas para irrigação no reservatório Epitácio Pessoa/PB em 2019	94
Figura 23 - Volume (m ³) mensal do reservatório Epitácio Pessoa no período de janeiro/2009 a dezembro/2019; P = Início da operação do PISF	95
Figura 24 - Número de outorgas emitidas e as suas respectivas culturas no reservatório Epitácio Pessoa/PB em 2019	96
Figura 25 - Demanda de água (m ³ /s) por cultura (outorga) no reservatório Epitácio Pessoa	98
Figura 26 - Demanda de água (m ³ /s) mensal, por cultura, nos municípios de abrangência do reservatório Epitácio Pessoa. A: Barra de São Miguel; B: Boqueirão; e C: Cabaceiras	99
Figura 27 - Distribuição dos métodos de irrigação nos municípios de abrangência do reservatório Epitácio Pessoa	100
Figura 28 - Variação sazonal dos parâmetros físico-químicos no Alto Curso do rio Paraíba, no período de 2011 a 2019: A - Nitrogênio amoniacal total; B – Nitrito; C – Nitrato; e D - Fósforo total e o máximo valor permitido (MVP) de 0,030 mg L ⁻¹ para ambientes lênticos, estabelecido pela Resolução Conama 357/2005	103
Figura 29 - Variação sazonal da clorofila- α no Alto Curso do rio Paraíba, no período de 2011 a 2019, e o limite máximo de 30 $\mu\text{g L}^{-1}$ estabelecido pela Resolução Conama 357/2005	104
Figura 30 - Variação sazonal dos parâmetros físico-químicos no Alto Curso do rio Paraíba, no período de 2011 a 2019, e seus respectivos limites estabelecidos pela Resolução Conama 357/2005: A - Sólidos dissolvidos totais; B – Turbidez	105
Figura 31 - Variação sazonal do pH no Alto Curso do rio Paraíba, no período de 2011 a 2019, e a faixa limite de 6,0 a 9,0 estabelecida pela Resolução Conama 357/2005	106

Figura 32 - Variação sazonal dos parâmetros físico-químicos no Alto Curso do rio Paraíba, no período de 2011 a 2019, e seus respectivos limites estabelecidos pela Resolução Conama 357/2005: A – DBO; B – OD	106
Figura 33 - Variação sazonal dos coliformes termotolerantes no Alto Curso do rio Paraíba, no período de 2011 a 2019, e o limite máximo de 1.000 coliformes termotolerantes por 100 mililitros de amostra estabelecido pela Resolução Conama 357/2005	107
Figura 34 - Variação sazonal das características físicas no Alto Curso do rio Paraíba: A – Temperatura da água (2011 a 2019); B – Precipitação (2000 a 2019), onde: P1 e P2 - PCD Monteiro; P3 - PCD Camalaú; P4 - PCD Congo; P5 - Caraúbas e São Domingos do Cariri; P6 e P7 - PCD Boqueirão	108
Figura 35 - Volume mensal (m ³) dos reservatórios estudados no Alto Curso do rio Paraíba, de 2009 a 2019. P: Início da operação do PISF	109
Figura 36 - Localização das estações de amostragem mais críticas quanto aos parâmetros da qualidade da água. Q68-Reservatório Poções; Q69- Jusante do reservatório Poções; Q70- Reservatório Camalaú; Q71- Jusante do reservatório Camalaú; Q72-Montante do reservatório Epitácio Pessoa; Q73- Reservatório Epitácio Pessoa e Q74-Jusante do reservatório Epitácio Pessoa	110
Figura 37 - Variação sazonal do IQA e IET no Alto Curso do rio Paraíba, no período de 2011 a 2019: A - Índice de qualidade da água (IQA); B - Índice de estado trófico (IET)	112
Figura 38 - Riqueza da comunidade fitoplanctônica no Alto Curso do rio Paraíba, no período de 2011 a 2019	118
Figura 39 - Riqueza da comunidade fitoplanctônica nos pontos de amostragem localizados no Alto Curso do rio Paraíba, no período de 2011 a 2019. Q68: Reservatório Poções, Q69: Jusante do reservatório Poções, Q70: Reservatório Camalaú, Q71: Jusante do reservatório Camalaú, Q72: Montante do reservatório Epitácio Pessoa, Q73: Reservatório Epitácio Pessoa e Q74: Jusante do reservatório Epitácio Pessoa	119
Figura 40 - Densidade (célula.mL ⁻¹) da comunidade fitoplanctônica, nos períodos seco e chuvoso, no Alto Curso do rio Paraíba, no período de 2011 a 2019.....	120

Figura 41 - Abundância relativa da comunidade fitoplanctônica no Alto Curso do rio Paraíba, Eixo Leste do PISF, no período de 2011 a 2019	122
Figura 42 - Densidade total (célula.mL ⁻¹) da comunidade fitoplanctônica nos pontos de amostragem no Alto Curso do rio Paraíba, no período de 2011 a 2019.....	123
Figura 43 - Diagrama de ordenação da ACC entre as comunidades fitoplanctônicas e as variáveis ambientais nos pontos monitorados, no período de 2011 a 2019	127
Figura 44 - Volume final (V _{fin}) no reservatório Eptácio Pessoa, observado (obs) e calculado (cal) no AcquaNet, no período de janeiro de 1970 a dezembro de 2019	128
Figura 45- Regressão linear das vazões observadas e calculados no Acquanet no posto fluviométrico Bodocongó, no período de janeiro de 1970 a dezembro de 2019	129
Figura 46 - Curva de permanência do déficit de atendimento para abastecimento público nos reservatórios Poções e Eptácio Pessoa e PISF (SIAA - Campina Grande e Cariri), simulado no período de 1970 a 2019: A: Cenário 1 - sem influência das águas do PISF e B: Cenário 2 - com presença das águas do PISF	130
Figura 47 - Curva de permanência do déficit de atendimento para irrigação nos municípios contemplados pelo reservatório Eptácio Pessoa, simulado no período de 1970 a 2019: A: Cenário 1 - sem influência das águas do PISF e B: Cenário 2 - com presença das águas do PISF	131
Figura 48 - Percentual dos volumes (%) atingidos no reservatório Eptácio Pessoa em relação a capacidade total, nos anos de 2011 a 2016	132
Figura 49 - Curva de permanência do déficit de atendimento para abastecimento público nos reservatórios Poções e Eptácio Pessoa e PISF (SIAA - Campina Grande e Cariri), simulado no período de 2017 a 2019: A: Cenário 3 - com vazão operada no Projeto e B: Cenário 4 - com vazão de 10 m ³ s ⁻¹	133
Figura 50 - Curva de permanência do déficit de atendimento para irrigação nos municípios contemplados pelo reservatório Eptácio Pessoa, simulado	

	no período de 2017 a 2019: A: Cenário 3 - com vazão operada no Projeto e B: Cenário 4 - com vazão de $10 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$	133
Figura 51 -	Percentual dos volumes (%) atingidos no reservatório Eptácio Pessoa em relação a capacidade total, nos anos de 2017 a 2019	134
Figura 52 -	<i>Box-plot</i> da variabilidade da DBO no Alto Curso do rio Paraíba, no período de 2009 a 2019, simulada pelo AcquaNet e observado <i>in situ</i>	136
Figura 53 -	<i>Box-plot</i> da variabilidade do OD no Alto Curso do rio Paraíba, no período de 2009 a 2019, simulada pelo AcquaNet e observado <i>in situ</i>	137
Figura 54 -	<i>Box-plot</i> da variabilidade do fósforo total no Alto Curso do rio Paraíba, no período de 2009 a 2019, simulada pelo AcquaNet e observado <i>in situ</i> .	138
Figura 55 -	<i>Box-plot</i> da variabilidade do nitrogênio total no Alto Curso do rio Paraíba, no período de 2009 a 2019, simulada pelo AcquaNet e observado <i>in situ</i>	139
Figura 56 -	Curva de permanência da DBO, no Alto Curso do Rio Paraíba, no período de 1970 a 2019, com cenários representando presença e ausência das águas do PISF	142
Figura 57 -	Curva de permanência da OD, no Alto Curso do Rio Paraíba, no período de 1970 a 2019, com cenários representando presença e ausência das águas do PISF	145
Figura 58 -	Curva de permanência do fósforo total, no Alto Curso do Rio Paraíba, no período de 1970 a 2019, com cenários representando presença e ausência das águas do PISF	147
Figura 59 -	Curva de permanência do nitrogênio total, no Alto Curso do Rio Paraíba, no período de 1970 a 2019, com cenários representando presença e ausência das águas do PISF	149
Figura 60 -	Percentual de atendimento aos padrões de qualidade da água estabelecidos pela Resolução Conama 357/05, no Alto Curso do rio Paraíba, no período de 1970 a 2019. A- Cenário 1; B- Cenário 2	151
Figura 61 -	Curva de permanência da DBO, no Alto Curso do Rio Paraíba, no período de 2017 a 2019, com cenário 3 – simulado com as vazões reais de entrada para as águas do PISF; e cenário 4 – com vazão constante de $10 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$	154

Figura 62 - Curva de permanência do OD, no Alto Curso do Rio Paraíba, no período de 2017 a 2019, com cenário 3 – simulado com as vazões reais de entrada para as águas do PISF; e cenário 4 – com vazão constante de 10 m ³ s ⁻¹	156
Figura 63 - Curva de permanência do fósforo total, no Alto Curso do Rio Paraíba, no período de 2017 a 2019, com cenário 3 – simulado com as vazões reais de entrada para as águas do PISF; e cenário 4 – com vazão constante de 10 m ³ s ⁻¹	158
Figura 64 - Curva de permanência do nitrogênio total, no Alto Curso do Rio Paraíba, no período de 2017 a 2019, com cenário 3 – simulado com as vazões reais de entrada para as águas do PISF; e cenário 4 – com vazão constante de 10 m ³ s ⁻¹	159

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Efeitos da poluição da água para diferentes tipos de poluentes	37
Quadro 2 - Modelos matemáticos aplicados à modelagem da qualidade da água em rios e reservatórios	50
Quadro 3 - Características gerais do reservatórios estudados	60
Quadro 4 - Diretrizes para as instituições que participam da gestão dos recursos hídricos no Alto Curso do Rio Paraíba e no PISF	165

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Principais parâmetros da qualidade da água pela Resolução Conama 357/05 para águas de classe 2	36
Tabela 2 -	Estações de amostragem e sua localização referente ao Programa de monitoramento da Qualidade da Água e Limnologia (PBA 22)	65
Tabela 3 -	Campanhas do Programa de Monitoramento da Qualidade da Água e Limnologia (PBA 22) do PISF	65
Tabela 4 -	Técnicas de análise para os parâmetros físico-químicos	67
Tabela 5 -	Classificação do Índice de Qualidade da Água (IQA)	68
Tabela 6 -	Classificação do Estado Trófico para rios segundo Índice de Carlson modificado conforme a CETESB (2017)	70
Tabela 7 -	Classificação do Estado Trófico para reservatórios segundo Índice de Carlson modificado conforme a CETESB (2017)	70
Tabela 8 -	Descrição das categorias do Índice de Estado Trófico	70
Tabela 9 -	Área de drenagem, vazão média e específica dos postos fluviométricos Caraúbas, Poço de Pedras e Bodocongó, no período de janeiro/1970 a dezembro/2019	75
Tabela 10 -	Vazões ($m^3 s^{-1}$) mensais recebidas em Monteiro – PB no Eixo Leste do PISF entre 2017 e 2019	84
Tabela 11 -	Esgotamento sanitário das sedes municipais ao longo da calha principal no Alto Curso do rio Paraíba, no Eixo Leste do PISF	87
Tabela 12 -	Resumo das principais resoluções no Alto Curso do rio Paraíba (sistema hídrico Epitácio Pessoa)	89
Tabela 13 -	Distribuição das outorgas emitidas pela ANA nos municípios de abrangência do reservatório Epitácio Pessoa/PB em 2019	94
Tabela 14 -	Distribuição das culturas, número de outorgas, técnica de irrigação e suas respectivas demandas de vazão anuais nos municípios de abrangência do reservatório Epitácio Pessoa em 2019	97
Tabela 15 -	Demanda de água por técnica de irrigação nos municípios de abrangência do reservatório Epitácio Pessoa	100
Tabela 16 -	Valores de referência da eficiência das técnicas de irrigação estabelecido pela ANA	101

Tabela 17 -	Valores e classificação do IQA e IET no Alto Curso do rio Paraíba, no período de 2011 a 2019	113
Tabela 18 -	Riqueza e densidade (célula.mL ⁻¹) total dos táxons fitoplanctônicos identificados nos pontos de amostragem localizados no Alto Curso do rio Paraíba, Eixo Leste do PISF, no período de 2011 a 2019. Q68: Reservatório Poções, Q69: Jusante do reservatório Poções, Q70: Reservatório Camalaú, Q71: Jusante do reservatório Camalaú, Q72: Montante do reservatório Eptácio Pessoa, Q73: Reservatório Eptácio Pessoa e Q74: Jusante do reservatório Eptácio Pessoa	115
Tabela 19 -	Resumo estatístico e coeficientes de correlação entre as comunidades fitoplanctônicas e as variáveis ambientais dos dois primeiros eixos da ACC	126
Tabela 20 -	Varição das vazões com déficit de atendimento para irrigação, nos municípios contemplados pelo reservatório Eptácio Pessoa, simulado no período de 1970 a 2019	131
Tabela 21 -	Varição das vazões com déficit de atendimento para irrigação, nos municípios contemplados pelo reservatório Eptácio Pessoa, simulado no período de 2017 a 2019, nos cenários 3 e 4	134
Tabela 22 -	Medidas de gestão da água para enfrentamento à crise hídrica no reservatório Eptácio Pessoa de 2014 a 2016	161

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AESA	Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
AOR	Atlântico Nordeste Oriental
CAGEPA	Companhia de Águas e Esgotos da Paraíba
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoa de Nível Superior
CBHRP	Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba
CBHSF	Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco
CHESF	Companhia Hidroelétrica do São Francisco
CNARH	Cadastro Nacional de Usuários de Recursos Hídricos
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
CODEVASF	Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DNOCS	Departamento Nacional de Obras Contra as Secas
DRDH	Declaração de Reserva de Disponibilidade Hídrica
EUPSM	Equação Universal de Perda de Solos Modificada
ETA	Estação de Tratamento de Água
FACEPE	Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INNOVATE	<i>Interplay between the multiple use of water reservoirs via innovative coupling of substance cycles in aquatic and terrestrial ecosystem</i>
IQA	Índice de Qualidade das Águas
LABSID	Laboratório de Sistemas de Suporte a Decisões
LP	Licença Prévia
MDR	Ministério do Desenvolvimento Regional
MI	Ministério da Integração Nacional
MMA	Ministério do Meio Ambiente

NT	Nitrogênio total
NUPEA	Núcleo de Pesquisa em Ecossistemas Aquáticos
OD	Oxigênio dissolvido
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
PBA	Programa de Monitoramento Ambiental
PCDs	Plataformas de Coleta de Dados
PERH	Política Estadual de Recursos Hídricos
PGA	Plano de Gestão Anual
PISF	Projeto de Integração do Rio São Francisco com Bacias do Nordeste Setentrional
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
POA	Plano Operativo Anual
PT	Fósforo total
RBRH	Revista Brasileira de Recursos Hídricos
REGLA	Sistema Federal de Regulação de Usos
SIAA	Sistema Integrado de Abastecimento
SINGREH	Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos
SWAT	<i>Soil and Water Assessment Tool</i>
SWIM	<i>Soil and Water Integrated Model</i>
SSD	Sistema de Suporte à Decisão
SUDEMA	Superintendência de Administração do Meio Ambiente da Paraíba
SUDENE	Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
UFRPE	Universidade Federal Rural de Pernambuco
UNEB	Universidade do Estado da Bahia
USP	Universidade de São Paulo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	20
1.1	APRESENTAÇÃO DA AUTORA.....	20
1.2	IMPORTÂNCIA DO TEMA.....	21
1.3	HIPÓTESE.....	23
1.4	OBJETIVOS.....	24
1.4.1	Objetivo geral.....	24
1.4.2	Objetivos específicos.....	24
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	25
2.1	RECURSOS HÍDRICOS E QUALIDADE DA ÁGUA.....	25
2.1.1	Aspectos legais e institucionais da gestão das águas.....	27
2.1.2	Usos múltiplos da água.....	31
2.1.3	Qualidade da água.....	35
2.2	EXPERIÊNCIAS DE INTEGRAÇÃO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS.....	40
2.3	PROJETO DE INTEGRAÇÃO DO RIO SÃO FRANCISCO COM BACIAS DO NORDESTE SETENTRIONAL.....	43
2.4	MODELAGEM MATEMÁTICA APLICADA AOS RECURSOS HÍDRICOS.....	47
2.4.1	Modelos matemáticos de alocação e qualidade da água.....	49
2.4.2	Descrição do modelo AcquaNet.....	52
3	METODOLOGIA.....	57
3.1	ÁREA DE ESTUDO.....	57
3.2	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	63
3.2.1	Levantamento de dados secundários.....	63
3.2.2	Levantamento das outorgas para captação de água.....	64
3.2.3	Análise da qualidade da água.....	64
3.2.4	Modelagem da qualidade da água do Alto Curso do Rio Paraíba.....	72
3.2.4.1	Dados de entrada.....	72
3.2.4.2	Modelo AcquaNet.....	76
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	85
4.1	ANÁLISE DOS USOS E DEMANDA DE ÁGUA NO ALTO CURSO DO RIO PARAÍBA.....	85

4.1.1	Usos e demandas da água no reservatório Poções.....	92
4.1.2	Usos e demandas de água no reservatório Epitácio Pessoa.....	93
4.2	ANÁLISE DA QUALIDADE DA ÁGUA DO ALTO CURSO DO RIO PARAÍBA.....	102
4.2.1	Avaliação físico-química da água.....	102
4.2.2	Índice de Qualidade da Água (IQA) e Índice de Estado Trófico (IET).....	111
4.2.3	Avaliação da comunidade fitoplanctônica.....	115
4.3	CENÁRIOS DE ATENDIMENTO ÀS DEMANDAS OUTORGADAS NO ALTO CURSO DO RIO PARAÍBA.....	128
4.3.1	Calibração das vazões do sistema.....	128
4.3.2	Análise dos cenários de alocação de água.....	129
4.3.2.1	Cenários: 1 – com PISF e 2 – sem PISF	130
4.3.2.2	Cenários: 3 – vazão real e 4 – vazão máxima	132
4.4	MODELAGEM DA QUALIDADE DA ÁGUA NO ALTO CURSO DO RIO PARAÍBA.....	135
4.4.1	Calibração do modelo de qualidade da água.....	135
4.4.2	Análise dos cenários de qualidade da água.....	141
4.4.2.1	Cenários: 1 – com PISF e 2 – sem PISF.....	141
4.4.2.2	Cenários: 3 – vazão real e 4 – vazão máxima.....	153
4.5	DESAFIOS PARA SUSTENTABILIDADE DA ALOCAÇÃO E QUALIDADE DE ÁGUA EM TRECHO DO EIXO LESTE DO PISF.....	161
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	170
5.1	CONCLUSÕES.....	170
5.2	RECOMENDAÇÕES.....	174
	REFERÊNCIAS.....	175
	APÊNDICE A - ARTIGOS SUBMETIDOS PARA PUBLICAÇÃO.....	196

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo contém uma breve apresentação da autora, seguida da justificativa da temática escolhida para o desenvolvimento desta pesquisa, a hipótese e os objetivos.

1.1 APRESENTAÇÃO DA AUTORA

A autora possui Graduação em Licenciatura em Ciências Biológicas pela Universidade Estadual da Bahia (UNEB) (2012), Especialização em Gestão Ambiental e Recursos Hídricos pela Faculdade São Luís de França (2013), Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) (2017) e em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) (2017).

Seu interesse na área da Limnologia e recursos hídricos, teve início durante a graduação (desde 2008), onde realizou estudo sobre a comunidade fitoplanctônica como bioindicador da qualidade da água. em bacia hidrográfica no Eixo Norte do Projeto de Integração do Rio São Francisco com Bacias do Nordeste Setentrional (PISF), tendo como estudo de caso a bacia do rio Piranhas Açu – PB/RN.

Atualmente é bolsista de doutorado da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoa de Nível Superior (CAPES) e atua nos Programas de Monitoramento do PISF e Ramal do Agreste - PE (PBA 13, 16, 20, 22 e 26), financiado pelo Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR).

Participou de importantes projetos como: “Sistema de Apoio à Decisão para Gestão Ambiental do Arranjo Produtivo da Piscicultura em Reservatórios no Semiárido de Pernambuco” financiado pela Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) e no Projeto de Cooperação Internacional *Interplay between the multiple use of water reservoirs via innovative coupling of substance cycles in aquatic and terrestrial ecosystem* (Innovate), desenvolvido entre a UFPE e a *Technische Universität Berlin* – Alemanha.

Atuou como bióloga no Monitoramento Limnológico no Submédio e Baixo São Francisco, contemplando os reservatórios Sobradinho, Itaparica, Complexo Paulo Afonso e Xingó na Água e Terra Consultoria e Planejamento Ambiental (2013 - 2014). Na área de elaboração de Estudos de Impactos Ambiental (EIA/RIMA), atuou nas barragens da Mata

Sul e na Recuperação da Orla Marítima da Região Metropolitana do Recife, no Estado de Pernambuco, pelo Instituto de Tecnologia de Pernambuco (ITEP), realizando, também, outras atividades nesta instituição como identificação e contagem de fitoplâncton, análise de clorofila- α e análise de toxicidade de cianobactérias através de bioensaio (2011- 2013).

1.2 IMPORTÂNCIA DO TEMA

Os recursos hídricos possuem papel importante no desenvolvimento do país, se caracterizando como agente limitador das atividades econômicas, sobretudo no semiárido, região com disponibilidade hídrica irregular. Seus usos precisam ser gerenciados de forma sustentável para garantir a manutenção deste recurso atual e futuramente, minimizando os conflitos entre os diversos usuários.

O aperfeiçoamento da gestão sustentável dos recursos hídricos requer essencialmente planejamento, controle do uso da água, monitoramento, manejo dos sistemas hídricos e medidas para gestão de riscos, sobretudo, para gerenciar os problemas de disponibilidade hídrica irregular em regiões semiáridas. A disponibilidade hídrica é afetada diretamente pelo aumento populacional e crescimento econômico que geram ampliação da demanda de água, além das mudanças climáticas e os seus efeitos nos eventos hidrológicos, pela ausência de planejamento e ações institucionais coordenadas, pela falta de investimentos em infraestrutura hídrica e saneamento básico e pelos conflitos pelo uso da água (ANA, 2019a).

As condições climáticas da região semiárida, apresentando uma das mais baixas disponibilidades hídricas do Brasil, temperaturas elevadas durante todo o ano, baixas amplitudes térmicas, forte insolação e altas taxas de evapotranspiração, que influenciam diretamente na quantidade e qualidade da água, favorecendo a redução da qualidade das águas em muitos reservatórios de múltiplos usos e acelerando o processo de eutrofização (SOBRAL et al., 2011; ARAÚJO-FILHO et al., 2013; ANA, 2015; SOBRAL et al., 2018). Essas características levam as taxas de balanço hídrico a percentuais negativos no semiárido, configurando-a numa região com muitas vulnerabilidades e ocorrência de períodos críticos de estiagem.

Como alternativa para minimizar os problemas de déficit hídrico, grandes rios vêm sendo fragmentados para construção de reservatórios de abastecimento, mas no semiárido algumas regiões de baixa disponibilidade hídrica e rios intermitentes não vêm conseguindo manter os sistemas de açudagem de forma satisfatória.

Neste sentido, estrategicamente algumas alternativas para fornecer água em regiões semiáridas no Nordeste vêm sendo aplicadas, entre elas o Projeto de Integração do Rio São Francisco com Bacias do Nordeste Setentrional (PISF), que tem como objetivo garantir segurança hídrica a cerca de 12 milhões de pessoas, em 390 municípios nos estados de Pernambuco, Ceará, Rio Grande do Norte e Paraíba, executado anteriormente pelo Ministério da Integração Nacional (MI) (BRASIL, 2004; 2016), e atualmente pelo Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR).

O objetivo do PISF é transferir, por meio dos Eixos Leste e Norte, águas da bacia do rio São Francisco para os rios no Nordeste Setentrional, onde se observa grande déficit hídrico. Com 477 quilômetros de extensão distribuídos nos dois eixos, as obras do PISF passam pelos seguintes municípios no Eixo Norte: Cabrobó, Salgueiro, Terra Nova e Verdejante (PE); Pena Forte, Jati, Brejo Santo, Mauriti e Barro (CE); em São José de Piranhas, Monte Horebe e Cajazeiras (PB). Já no Eixo Leste, o empreendimento atravessa os municípios pernambucanos de Floresta, Custódia, Betânia e Sertânia; e em Monteiro, na Paraíba (BRASIL, 2004; 2016).

No Eixo Leste do PISF, as águas do rio São Francisco captadas no reservatório Itaparica, são conduzidas até a bacia do rio Paraíba em Monteiro - PB, onde ocorre o primeiro evento de mistura das águas no Eixo. Essas águas são armazenadas, primeiramente, no reservatório Poções, e em seguida, nos reservatórios Camalaú e Epitácio Pessoa, situados nos municípios de Camalaú - PB e Boqueirão - PB, respectivamente. Parte das águas do referido eixo são conduzidas também para o Estado de Pernambuco, no entanto as bacias receptoras são afluentes do rio São Francisco, como a bacia do rio Moxotó (BRASIL, 2004; 2016).

A integração de diferentes bacias pode causar impactos nos corpos de água receptores, de ordem positiva como contribuição na diluição dos nutrientes, materiais suspensos e minerais na coluna d'água, ou negativos, com a introdução de espécies exóticas ou aumento de nutrientes e da carga orgânica caso o rio doador esteja eutrofizado (BARBOSA et al., 2021). Dessa forma, o monitoramento da qualidade da água nesses ambientes, buscando avaliar os impactos da transposição de bacias hidrográficas, nas características físico-químicas e biológicas dos rios receptores é de fundamental importância para garantir a qualidade e o uso sustentável, sobretudo as represadas.

De acordo com a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2015), a qualidade das águas no semiárido apresenta grande ocorrência de trechos considerados como críticos quali-quantitativamente, devido à baixa disponibilidade hídrica dos corpos d'água, associado a outros fatores, como os baixos níveis de tratamento de esgoto, alto tempo de residência da água e a floração de cianobactérias potencialmente tóxicas nos reservatórios.

Sobral et al. (2018), destacam que na região semiárida, um dos grandes desafios frente às mudanças climáticas é a gestão dos reservatórios.

Para assessorar na resolução dos complexos problemas de gestão dos recursos hídricos, o uso de ferramentas matemáticas e computacionais capazes de elaborar cenários e simulações, auxiliam no planejamento e na tomada de decisão quanto à capacidade de suporte dos recursos hídricos, permitindo indicar os fatores que interferem na qualidade da água, antever os impactos decorrentes dos possíveis cenários hipotéticos e propor alternativas para que se encontre a melhor solução nas decisões de gestão de bacias hidrográficas (GASTALDINI et al., 2002; MOHOR e MENDIONDO, 2017).

Entre os modelos existentes poucos são capazes de simular a quantidade e a qualidade da água em ambientes lóticos e lênticos, e o Sistema de Suporte à Decisão (SSD) AcquaNet é capaz de realizar análise integrada do sistema, de modo a simular e otimizar tanto as questões voltadas à alocação de água, buscando soluções para atendimento às demandas, como simular a qualidade da água (MÉLLO JUNIOR et al., 2005). Com isso, auxiliar na operação otimizada dos corpos hídricos para o melhor aproveitamento da água.

O uso integrado do monitoramento ambiental e a modelagem matemática oferecem bom custo-benefício em relação à utilização somente do monitoramento *in loco*, considerando a distribuição espacial e temporal da informação gerada, os impactos antrópicos e as demandas da bacia (SOUZA, 2006).

Desse modo, no presente estudo, as análises da alocação e monitoramento da qualidade da água, associada a modelagem quali-quantitativa da água, atuam como ferramentas para subsidiar a tomada de decisão quanto às condições para atendimento às demandas prioritárias e garantia da qualidade da água no Alto Curso do rio Paraíba. Os resultados obtidos contribuem para o desenvolvimento de políticas públicas de gestão e uso sustentável dos recursos hídricos, conservação dos ecossistemas aquáticos envolvidos e geração de informações sobre monitoramento e avaliação das condições ambientais e os usos múltiplos da água, no Eixo Leste do Projeto de Integração do rio São Francisco.

1.3 HIPÓTESE

A avaliação integrada das condições quali-quantitativas da água, associada a projeção de cenários de alocação e qualidade da água no modelo AcquaNet, fornecem subsídios para promover uma discussão sobre os principais desafios para a gestão dos recursos hídricos e auxiliar no processo de tomada de decisão quanto ao uso sustentável da água.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo geral

Modelar a quantidade e a qualidade da água do Eixo Leste do Projeto de Integração do Rio São Francisco com Bacias do Nordeste Setentrional (PISF), tendo como estudo de caso o Alto Curso da Bacia Hidrográfica do rio Paraíba.

1.4.2 Objetivos específicos

- Caracterizar os usos e a demandas de água no Alto Curso do rio Paraíba;
- Avaliar a qualidade da água por meio de parâmetros físico-químicos e biológicos;
- Calibrar o modelo AcquaNet para quantidade e qualidade da água na área de estudo;
- Analisar cenários considerando os usos múltiplos e a qualidade da água no modelo AcquaNet;
- Delinear os principais desafios para sustentabilidade da alocação e qualidade de água em trecho do Eixo Leste do PISF.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo apresenta os principais conceitos e trabalhos científicos relacionados aos aspectos legais e institucionais que envolvem os recursos hídricos, a quantidade e a qualidade da água, as experiências de projetos de integração de bacias no mundo e no Brasil, com detalhamento do Projeto de Integração de Bacias do rio São Francisco, juntamente com os modelos matemáticos aplicados à alocação e qualidade da água.

2.1 RECURSOS HÍDRICOS E QUALIDADE DA ÁGUA

O Brasil é conhecido pela abundância de recursos hídricos, mas a distribuição sazonal e espacial é desigual no território nacional. A região Nordeste possui apenas 3% da disponibilidade hídrica do país e a bacia do rio São Francisco representa 70% dessa oferta de água (DE ANDRADE et al., 2011). Desta forma, os limites administrativos são diferentes da organização político-administrativa dos Estados e encontra-se dividida em 12 regiões hidrográficas definidas pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), gerenciada pela ANA e por órgãos gestores estaduais de recursos hídricos (ANA, 2019c).

No Nordeste, a região semiárida, demanda atenção especial no tocante ao uso e a oferta de água, pois apesar da presença de várias bacias hidrográficas, a região exibe carência de infraestrutura hídrica adequada para dar acesso à água para todos, a disponibilidade hídrica é irregular, sofre pressão hídrica pelos usos intensivos das diferentes atividades econômicas e pela problemática do lançamento de efluente e esgoto doméstico sem tratamento (ANA, 2017c; 2019c; OLIVEIRA, 2019). Esses fatores juntos contribuem para os reduzidos valores de disponibilidade hídrica observados, que não dependem somente da quantidade de água, mas, também da qualidade.

Frente à essas questões ambientais, entre outras, durante reunião da Cúpula das Nações Unidas em 2015, que vem sendo realizada periodicamente, a Organização das Nações Unidas (ONU) e os líderes de governos mundiais adotaram a Agenda 2030, que é um plano de ação contendo 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e 169 metas associadas, e comprometeram-se com a coletividade e cooperação vantajosa para todos em busca da sustentabilidade para os povos, o planeta e a prosperidade (ONU, 2015).

O ODS 6 – Água potável e saneamento tem como objetivo assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todas e todos. Estão atribuídas seis metas ao ODS 6, monitoradas por indicadores, e estas são (ONU, 2015):

- 6.1 Até 2030, alcançar o acesso universal e equitativo à água potável e segura para todos;
- 6.2 Até 2030, alcançar o acesso a saneamento e higiene adequados e equitativos para todos, e acabar com a defecação a céu aberto, com especial atenção para as necessidades das mulheres e meninas e daqueles em situação de vulnerabilidade;
- 6.3 Até 2030, melhorar a qualidade da água, reduzindo a poluição, eliminando despejo e minimizando a liberação de produtos químicos e materiais perigosos, reduzindo à metade a proporção de águas residuais não tratadas e aumentando substancialmente a reciclagem e reutilização segura globalmente;
- 6.4 Até 2030, aumentar substancialmente a eficiência do uso da água em todos os setores e assegurar retiradas sustentáveis e o abastecimento de água doce para enfrentar a escassez de água, e reduzir substancialmente o número de pessoas que sofrem com a escassez de água;
- 6.5 Até 2030, implementar a gestão integrada dos recursos hídricos em todos os níveis, inclusive via cooperação transfronteiriça, conforme apropriado;
- 6.6 Até 2020, proteger e restaurar ecossistemas relacionados com a água, incluindo montanhas, florestas, zonas úmidas, rios, aquíferos e lagos;
- 6.a Até 2030, ampliar a cooperação internacional e o apoio à capacitação para os países em desenvolvimento em atividades e programas relacionados à água e saneamento, incluindo a coleta de água, a dessalinização, a eficiência no uso da água, o tratamento de efluentes, a reciclagem e as tecnologias de reuso;
- 6.b Apoiar e fortalecer a participação das comunidades locais, para melhorar a gestão da água e do saneamento (ONU, 2015, p. 25).

Com intuito de contribuir para o monitoramento e o cumprimento das metas do ODS 6, a ANA lançou o Relatório ODS 6 no Brasil – visão da ANA sobre os indicadores. O relatório traz dados sobre a quantidade, qualidade e gestão das águas e mostra que a eficiência de uso da água no Brasil teve leve aumento, e estes, possivelmente, ocorreram devido às ações como substituição de tecnologias utilizadas na irrigação que reduzem a quantidade de água utilizada, reuso da água pelas indústrias, cobrança pelo uso da água e mudança de hábitos da população devido à escassez hídrica. No entanto, o baixo tratamento de esgotos representa um dos maiores gargalos do Brasil para alcançar as metas do ODS 6 (ANA, 2019d).

O ODS 6 interage com maior a parte dos outros 17 ODS, uma vez que os usos múltiplos da água afetam diversas esferas e serviços da sociedade, geram conflitos e riscos ao desenvolvimento. Entre os demais ODS, se destacam o ODS 1 – Erradicação da pobreza e ODS 2 – Fome zero e agricultura sustentável, onde a água tem papel crucial no desenvolvimento da atividade agrícola, e esta é elemento chave para o combate à fome, além de ser responsável pelo desenvolvimento regional em áreas rurais; ODS 3 – Saúde e bem-estar: observando a relação entre doenças de veiculação hídrica e o acesso à água tratada e ao esgotamento sanitário; ODS 12 – Consumo e produção sustentáveis: na busca do uso eficiente dos recursos naturais; e o ODS 17 - Parcerias e meios de implementação: o uso sustentável da água vem como tema de parcerias e cooperações institucionais para difundir informação e tecnologias (ONU, 2015; MILAN, 2017).

O Brasil, país de nível continental e com uma das maiores disponibilidades de água doce do mundo, mas, de distribuição heterogênea, necessita do desenvolvimento de uma gestão adequada dos recursos hídricos para buscar a seguridade da sua disponibilidade e que compreenda a aplicação de medidas de controle (SOBRAL, 2011).

Vários estudos discutem que a gestão dos usos e demandas hídricas eficiente e sustentável dependem principalmente da implementação de normas legais e seus instrumentos (ALMEIDA; CURI, 2016; FARIAS et al., 2016; FERREIRA, 2016; FARIAS et al., 2017; ANA, 2019d; OLIVEIRA, 2019), sobretudo para garantir os usos múltiplos da água nos períodos de escassez hídrica quando os conflitos são agravados (SOBRAL et al., 2018).

2.1.1 Aspectos legais e institucionais da gestão das águas

A origem do modelo atual de gestão das águas no Brasil, teve como base o pioneiro Código das Águas, promulgado em 1934, quando a água era apresentada como um bem em abundância no país (ANA, 2017c). No entanto, com as posteriores crises hídricas ocorridas em algumas regiões, a gestão da água evoluiu e, em 1997, foi criada a lei federal que seria um divisor de águas da gestão de recursos hídricos no país.

A fim de promover o gerenciamento racional e sustentável da água e estabelecer um posicionamento jurídico no Brasil, foi criada a Lei Federal nº 9.433/1997, conhecida como Lei das Águas, na qual foi estabelecida a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), que por sua vez, criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH) (BRASIL, 1997), se tornando um marco legal para proteção das águas brasileiras. A PNRH institui no seu Art. 1º os seguintes fundamentos (BRASIL, 1997):

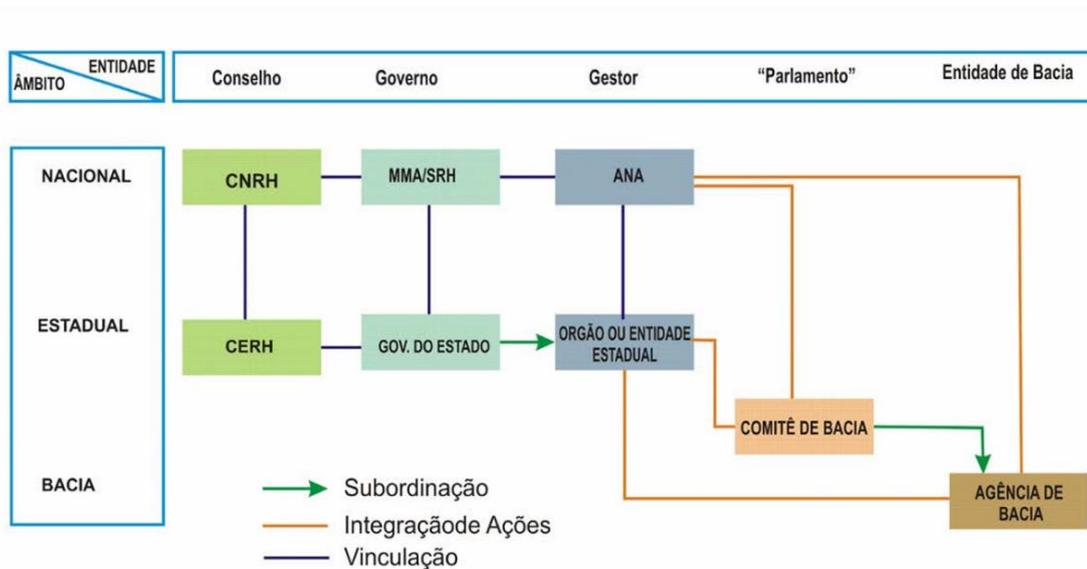
- I – a água é um bem de domínio público;
- II – a água é um recurso natural limitado, dotado de valor econômico;
- III – em situações de escassez, o uso prioritário dos recursos hídricos é o consumo humano e a dessedentação de animais;
- IV – a gestão dos recursos hídricos deve sempre proporcionar o uso múltiplo das águas;
- V – a bacia hidrográfica é a unidade territorial para implementação da PNRH e atuação do SINGREH;
- VI – a gestão dos recursos hídricos deve ser descentralizada e contar com a participação do Poder Público, dos usuários e das comunidades.

A Lei das Águas estabeleceu seis instrumentos importantes para o desenvolvimento da PNRH, são eles: os Planos de Recursos Hídricos; o enquadramento dos corpos de água em classes, segundo os usos preponderantes da água; a outorga dos direitos de uso de recursos

hídricos; a cobrança pelo uso de recursos hídricos; a compensação aos municípios; e o Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos (BRASIL, 1997).

O Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos é responsável pela coleta, tratamento, armazenamento e recuperação de informações sobre os recursos hídricos, e os dados gerados pelos órgãos integrantes do SINGREH são incorporados a esse Sistema. A Figura 1 traz uma síntese do SINGREH de acordo com suas categorias hierárquicas.

Figura 1 – Modelo do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH) no Brasil



Fonte: Brasil (2008).

Uma das ferramentas de planejamento dos usos múltiplos da água mais relevantes se dá por meio de autorizações denominadas outorga dos direitos de uso de recursos hídricos, um importante instrumento de gestão, para controlar o acesso à água e priorizar os usos essenciais, visando garantir o cumprimento dos objetivos da PNRH (SANTOS e CUNHA, 2013; ANA, 2017). A ANA é o órgão responsável por emitir as outorgas para os corpos hídricos dulcícolas sob domínio da União ou administrados por instituições federais. De acordo com a Resolução 1.938, de 30 de outubro de 2017, da ANA, a outorga tem como objetivo assegurar o controle qualitativo e quantitativo dos usos de recursos hídricos e o efetivo exercício dos direitos de acesso à água (ANA, 2017).

As outorgas são definidas em três categorias: preventiva, quando o usuário ainda não possui o direito de uso, apenas foi reservada vazão passível de outorga, com prazo máximo de três anos; de direito de uso, quando o usuário tem o direito de uso do recurso hídrico; e Declaração de Reserva de Disponibilidade Hídrica (DRDH), para casos específicos de

autorizações de uso de potencial de energia hidráulica e da construção de eclusas ou outros dispositivos de transposição hidroviária de níveis em corpo de água da União, e é análoga à outorga preventiva. Tanto a outorga preventiva, como a DRDH, pode ser transformada em outorga de direito de uso (ANA, 2019e).

A solicitação de outorga de uso de recursos hídricos na área de estudo, Eixo Leste do PISF, tem sido realizada em um trabalho conjunto da ANA com a Agência Pernambucana de Águas e Climas (APAC), em Pernambuco, e com a Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESA), na Paraíba, órgão gestor da área de estudo desta pesquisa. Ambas as agências, foram criadas com objetivo de fortalecer o planejamento e a regulação dos usos múltiplos do recursos hídricos em seus respectivos Estados, instituindo as Políticas Estaduais de Recursos Hídricos (PERH), Lei nº 12.984 de 30 de dezembro de 2005, em Pernambuco, e a Lei nº 6.308 de 2 de julho de 1996, na Paraíba, e os Sistemas Integrado de Planejamento e Gerenciamento de Recursos Hídricos (SIGRH-PE e SIGERH-PB) (PARAÍBA, 1996; PERNAMBUCO, 2005).

A Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESA), fundada em julho de 2005, tem como umas das principais competências a implantação e atualização do cadastro de usuários de água, emissão de outorga e licenças de obras hídricas, monitoramento e fiscalização dos recursos hídricos e cobrança pelo uso dos recursos hídricos (PARAÍBA, 2005).

Associado ao controle dos usos da água, a ANA formulou a criação e aplicação de marcos regulatórios, que são conjuntos de regras definidas pela Agência e demais autoridades outorgantes, e estas levam em conta a percepção integrada do problema de determinada bacia hidrográfica, considerando os conflitos, suas especificidades locais e definindo regras de convivência entre os usuários para garantir o desenvolvimento sustentável (ALVES, 2016).

De acordo com Alves e Araújo (2016), a implantação e operação de sistemas hídricos inviáveis do ponto de vista financeiro para companhias de abastecimento, é uma problemática tanto na cidade como no campo, mas a localização das áreas rurais dificulta ainda mais a resolução destas questões. Por isso, a promoção de políticas públicas direcionadas são essenciais na gestão sustentável da água.

No que diz respeito ao sistema de gestão da bacia do rio Paraíba no âmbito do PISF, marcos regulatórios com intuito de gerenciar os usos da água em reservatórios existentes na bacia vêm sendo criados pela ANA e a AESA, por meio de um sistema de gestão integrada. Tais políticas públicas vêm estabelecendo condições de usos dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos na bacia do rio Paraíba, durante os períodos de pré-operação e operação do PISF.

Ora o uso com vazão determinada foi liberado apenas para fins de consumo humano, dessedentação animal, atividades de subsistências e garantia de vazão de defluência, ora sendo retomada a liberação para irrigação após início da operação do PISF (ANA, 2018b; 2019b, c; ANA; AESA, 2017d; 2020b; 2021a)

Além disso, foi instituído pelo Decreto nº 5.995, de 19 de dezembro de 2006, o Sistema de Gestão do PISF (SGIB), para a coordenação de competências com finalidade de promover a sustentabilidade da operação, a gestão integrada e descentralizada dos recursos hídricos, viabilizar a melhoria das condições de abastecimento de água nos Estados integrantes do PISF, induzir o uso eficiente dos recursos hídricos, coordenar a execução do Projeto, entre outros (BRASIL, 2006).

Este sistema é formado pelo atual Ministério do Desenvolvimento Regional, como órgão coordenador; a ANA, como entidade reguladora; um Conselho Gestor, tendo como um dos seus integrantes um representante dos Comitês das Bacias Hidrográficas envolvidas no Projeto; a Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba (CODEVASF), como Operadora Federal; e como Operadora Estadual, a Agência Pernambucana de Águas e Climas (APAC) em Pernambuco, e a AESA, na Paraíba.

Apesar da demanda hídrica a qual se pretende atender com as águas da bacia do rio São Francisco, este rio também requer atenção, pois apresentou níveis de segurança hídrica baixa em grande parte da sua área, destacando os anos entre 2012 e 2016, quando enfrentou uma seca histórica e perda significativa do volume de água nos seus reservatórios (ANA, 2019a). Segundo o Plano Nacional de Segurança Hídrica, as recentes preocupações com o balanço hídrico na bacia do rio São Francisco motivaram novas discussões, ainda prematuras, em torno da transposição de águas do rio Tocantins para o rio São Francisco. Portanto, o gerenciamento dos recursos hídricos deve considerar, essencialmente, as adaptações às mudanças climáticas.

A gestão da água na Paraíba, se complementa com o Plano Estadual de Recursos Hídricos, que tem como objetivo guiar a implementação das políticas nacional e estadual de recursos hídricos e com o Decreto nº 19.260/1997, que juntos regulamentam o sistema de outorgas no Estado, sob comando da AESA (PARAÍBA 1997; 2006).

Além da implementação do Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do rio Paraíba, instrumento de gestão preconizado pela Lei das Águas e que tem como objetivos norteadores o estabelecimento de um processo de planejamento integrado e participativo, consolidando o enquadramento dos corpos de água em classes de uso preponderantes e a utilização, recuperação, proteção e conservação dos recursos hídricos da bacia hidrográfica (PARAÍBA, 2001).

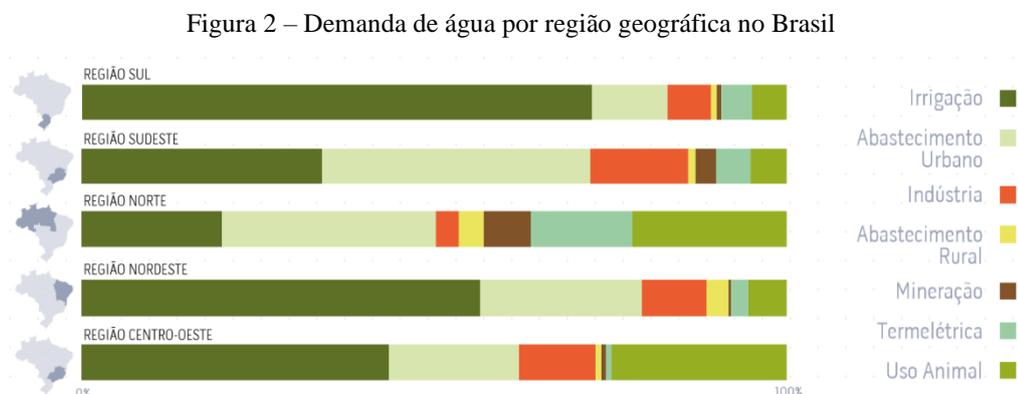
Outro instrumento de gestão consolidado é o Comitê Estadual de Bacias Hidrográficas, criado pelo Decreto Estadual nº 27.560/2006, que se configura como a primeira instância administrativa para arbitrar os conflitos relacionados aos recursos hídricos, realizar diagnóstico da situação dos recursos hídricos da bacia, dos riscos de racionamento, poluição e degradação ambiental. Junto com os usuários e a sociedade civil destacam-se como instituições corresponsáveis pela gestão da água (PARAÍBA, 2001; 2006b).

Todo esse arcabouço legal e institucional norteia a tomada de decisão pelas instituições e *stakeholders*, que necessitam adotar modelos de gestão que agreguem uma percepção sistêmica e integrada do meio ambiente, de forma participativa e descentralizada, para garantir os usos múltiplos da água de maneira sustentável e gerenciar os conflitos entre os usuários.

2.1.2 Usos múltiplos da água

Os principais usos da água no Brasil são para abastecimento urbano e rural, dessedentação animal, irrigação, industrial, mineração, geração de energia, navegação, pesca, aquicultura, turismo e lazer (ANA, 2019c; ANA, 2020c). Estes usos estão categorizados como usos consuntivos e não consuntivos.

Segundo a ANA (2019b), uso consuntivo é quando a água retirada é consumida, parcial ou totalmente, no processo a que se destina, não retornando diretamente ao corpo hídrico. Os usos da água que não afetam diretamente a quantidade, tais como navegação, pesca e lazer, são classificados como usos não consuntivos. Na Figura 2 é apresentado o percentual das demandas de água de acordo com os principais usos por região geográfica do Brasil (ANA, 2019c).



Fonte: ANA (2019c).

A evolução dos usos consuntivos dos recursos hídricos está atrelada ao desenvolvimento econômico e populacional (ANA, 2019 a; c) e, conseqüentemente, tem gerado pressão sobre os recursos hídricos (TUNDISI, 2013). As soluções para os principais desafios na gestão dos recursos hídricos, sobretudo em áreas de escassez hídrica como o semiárido, necessitam de um olhar dentro da perspectiva do desenvolvimento com convivência com a seca e as mudanças climáticas (ANA, 2015).

Os problemas pertinentes ao uso dos recursos hídricos no semiárido estão relacionados ao equilíbrio entre as demandas de uso da água, em termos quantitativos e qualitativos, com a oferta hídrica, que em geral tem mostrado regiões com déficit de acesso à água e risco aos setores produtivos (MENINO; CAVALCANTI, 2013; ANA, 2019b).

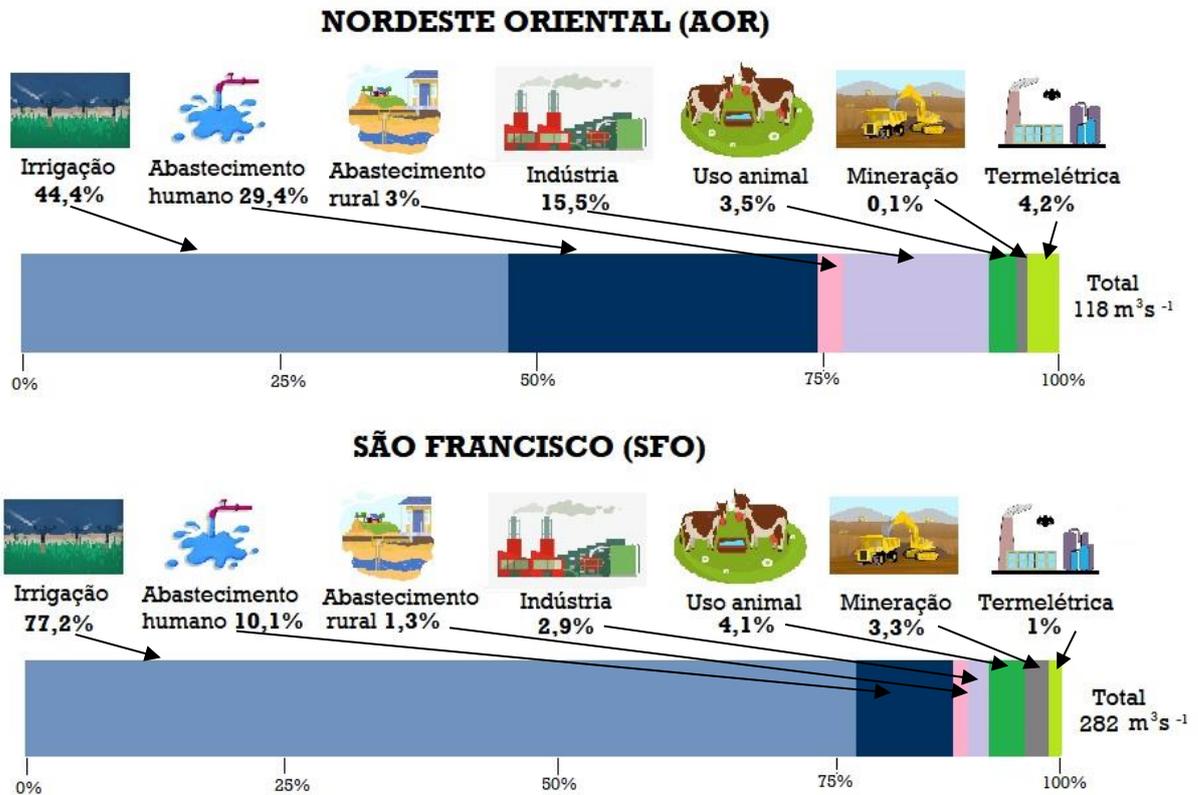
Neste contexto, dois tipos de intervenções vêm sendo aplicadas para melhor aproveitamento dos recursos hídricos no semiárido: (i) os sistemas de açudagem, que historicamente é a solução mais adotada para atendimento das demandas de água e regularização das vazões, e (ii) a implantação de projetos de irrigação. A Companhia Hidroelétrica do São Francisco (CHESF), o Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS), Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE) e a Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e Parnaíba (CODEVASF) têm sido os principais órgãos públicos encarregados da implantação e do gerenciamento desses projetos no Nordeste.

A implantação de obras de infraestrutura sozinhas é insuficiente para solucionar os problemas enfrentados pelas regiões de vulnerabilidade hídrica, pois as crescentes demandas levam à tendência de geração de conflitos. Os usos múltiplos da água precisam ser gerenciados de forma eficiente e sustentável, a fim de garantir seu uso primordial, o abastecimento humano.

A ANA (2015), destaca os principais temas prioritários para gestão dos conflitos pelos usos múltiplos da água no semiárido: monitoramento e gestão da baixa oferta hídrica, medidas para convivência com os eventos críticos, desertificação, transposição do rio São Francisco e infraestrutura hídrica, qualidade da água, demanda de irrigação e degradação ambiental.

A Figura 3 apresenta uma síntese das demandas totais de uso da água nas Regiões Hidrográfica Nordeste Oriental e do São Francisco, mostrando destaque para irrigação seguido do abastecimento humano (ANA, 2019b). A região hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental (AOR) possui quase a totalidade de sua área na Região do Semiárido Brasileiro e abrange os estados Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco e Alagoas (ANA, 2020a). Nesta região hidrográfica está situada a área de estudo desta pesquisa, o Eixo Leste do PISF.

Figura 3 - Demandas de retirada de água nas Regiões Hidrográfica Nordeste Oriental e do São Francisco



Fonte: Adaptado de ANA (2019b).

A agricultura irrigada é um dos maiores usos consuntivos da água, muitas vezes ocorrendo em bacias com déficit hídrico no país. No semiárido a irrigação é fundamental para expansão agrícola e o desenvolvimento local. Os perímetros irrigados são importantes expressões de iniciativas de desenvolvimento regional com representativa geração de emprego e renda, no entanto, a gestão tem sido um desafio. O setor representa maior parcela da demanda de água no semiárido, destacando a bacia do São Francisco, onde a irrigação é responsável por 77,2% da água retirada (ANA, 2019b).

O potencial de expansão da agricultura irrigada está atrelado aos conflitos pelos usos múltiplos da água, pois a água utilizada para este fim é indisponibilizada para outras aplicações na localidade onde os cultivos estão instalados, no curto espaço de tempo (ANA, 2017e). Ainda, práticas agrícolas com uso da irrigação sem o devido manejo, vêm contribuindo para a descaracterização da vegetação nativa e com o processo de desertificação do solo no semiárido (FEITOSA, 2011).

A partir da década de 80 pode ser observado um acelerado processo de expansão das áreas irrigadas, no entanto, na última década, com exceção da Bahia, houve relativa estabilidade

ou retração de áreas, face à redução dos investimentos em infraestrutura hídrica e da própria crise hídrica experimentada nos últimos anos (ANA, 2017e).

O relatório da ANA (2017c) chama atenção para o fato de que, desde meados de 2012 a 2016, a seca atingiu o semiárido e provocou redução acentuada no volume de água armazenado no Reservatório Equivalente do Nordeste, que é o somatório do volume de reservatórios com capacidade acima de 10.000.000 m³, verificada principalmente nos estados do Nordeste Setentrional (Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba e Pernambuco), com forte expressão nos reservatórios do semiárido. Como reflexo dessa seca de 5 anos consecutivos, em dezembro de 2016, um total de 65 dos açudes que fornecem água para abastecimento público encontravam-se secos e o volume de água correspondia a 11,5 % da capacidade total de armazenamento, com cerca de 67% do abastecimento público urbano no Nordeste Setentrional, sendo realizado por água superficial armazenada em açudes.

Dessa forma, a escassez hídrica tem levado à adoção de regras de restrição de uso dos recursos hídricos. Estas vão desde o racionamento de água até determinação de limite de retirada de água dos mananciais.

A garantia de volume para atendimento às demandas depende do aporte de água dos rios nos períodos úmidos, que consequentemente dependem do regime de chuvas, que em conjunto determinam as vazões afluentes e da conformação topográfica, sobretudo em regiões onde a evaporação é acentuada em relação à precipitação no próprio espelho d'água (ANA, 2017c).

Segundo Santos e Curi (2014), para garantir os usos prioritários, como abastecimento público em reservatórios de usos múltiplos, as demais retiradas, como irrigação, podem ser desenvolvidas, desde que sejam realizados estudos de quais culturas agrícolas devem ser cultivadas e em qual época do ano.

A garantia dos usos múltiplos da água está atrelada ao monitoramento eficiente desses usos, sendo um desafio, sobretudo no semiárido, pois o banco de dados é escasso, os pontos de amostragem muitas vezes são insuficientes e as medições dos parâmetros de quantidade e qualidade da água apresentam muitas falhas sazonalmente e com baixa qualidade. Apesar das lacunas, o cadastro de controle do uso da água realizado pelos órgãos ambientais é uma importante ferramenta para monitorar e avaliar os usos dos recursos hídricos, mesmo que muitas vezes não consigam refletir a situação real, pois os valores outorgados tendem a ser inferiores ao verdadeiro captado e ainda há a questão das retiradas clandestinas, difíceis de serem contabilizadas (ANA, 2019b).

2.1.3 Qualidade da água

A qualidade da água é tão importante quanto a quantidade, visto que, esse aspecto pode tornar a água disponível inviável para sua utilização. A avaliação da qualidade da água é realizada através da análise de parâmetros que representam características físicas, químicas e biológicas da água, e estes parâmetros, denominados indicadores, podem variar a depender dos usos dos recursos hídricos (VON SPERLING, 2005).

O monitoramento da qualidade das águas no Brasil é realizado em rios e reservatórios pela ANA e pelas Unidades da Federação. Em geral, os dados disponibilizados apresentam os seguintes parâmetros como indicadores da qualidade da água: *Escherichia coli*, oxigênio dissolvido (OD), fósforo total, condutividade, turbidez e Índice de Qualidade das Águas (IQA) (ANA, 2019c; ANA, 2020c; ANA, 2021b).

A Resolução Conama 357/2005, de 17 de março de 2005, complementada e alterada pela Resolução Conama 430/2011, de 16 de maio de 2011, recomenda condições e padrões de qualidade da água, como indicadores de impactos ambientais, considerando o enquadramento dos corpos hídricos (BRASIL, 2005). Com isso, um dos meios para avaliar a qualidade das águas é comparar os níveis de concentração dos parâmetros com as classes de enquadramento dos corpos hídricos, que ocorre segundo os seus usos preponderantes, sendo definidos em 5 classes. As classes Especial, 1 e 2, são destinadas aos usos das águas mais exigentes (proteção das comunidades aquáticas, abastecimento humano e recreação), enquanto as classes 3 e 4, aos menos exigentes (navegação etc.) (BRASIL, 1997; ANA, 2019d).

A classificação dos corpos hídricos tem intuito de garantir a qualidade das águas, por condições e padrões específicos, para assegurar seus usos de forma sustentável e o enquadramento dos corpos de água está baseado nos níveis de qualidade que devem possuir para atender aos usos múltiplos. O enquadramento é definido pelos usos preponderantes mais restritivos da água, atuais ou os pretendidos (BRASIL, 2005).

De acordo com Art. 42 da Resolução Conama 357/2005, enquanto não aprovados os respectivos enquadramentos, as águas doces serão consideradas classe 2, exceto se as condições de qualidade atuais forem melhores, o que determinará a aplicação da classe mais rigorosa correspondente (BRASIL, 2005).

A Tabela 1 traz os principais parâmetros da qualidade da água para classe 2, destinados ao consumo humano após tratamento convencional, proteção das comunidades aquáticas, recreação, irrigação de hortaliças, plantas frutíferas, parques, aquicultura, pesca etc.

Tabela 1 - Principais parâmetros da qualidade da água pela Resolução Conama 357/05 para águas de classe 2

Parâmetros	Limites máximo recomendados
Turbidez	100 UNT
Sólidos dissolvidos totais	500 mg/L
pH	6 a 9
Demanda bioquímica de oxigênio (DBO)	5 mg/L O ₂
Oxigênio dissolvido (OD)	Acima de 5 mg/L O ₂
Fósforo total	0,030 mg/L P, para ambientes lênticos 0,050 mg/L P, para ambientes intermediários
Nitrogênio amoniacal total	3,7 mg/L N, para pH ≤ 7,5 2,0 mg/L N, para 7,5 < pH ≤ 8,0 1,0 mg/L N, para 8,0 < pH ≤ 8,5 0,5 mg/L N, para pH > 8,5
Nitrito	1,0 mg/L N
Nitrato	10,0 mg/L N
Clorofila-a	≤ 30 µg/L
Cianobactérias	≤ 50.000 cél.mL ⁻¹
Coliformes termotolerantes	1.000 NMP/100mL em 80% de 6 amostra/ano

Fonte: Brasil (2005).

As atividades antrópicas são umas das principais responsáveis por modificar os parâmetros físico-químicos da água. Os impactos provenientes do uso e ocupação do solo, como a agricultura irrigada, e consequentemente, a intensificação da utilização de produtos como agrotóxicos, vêm sendo apontados por alterar a qualidade das águas (VON SPERLING, 2005). Além de contribuir com a salinização dos solos e aumento do processo de desertificação devido ao desmatamento realizado nas áreas de preparo do solo para o plantio (FEITOSA, 2011).

Outro fator relevante em relação à qualidade da água dos corpos hídricos é o lançamento de esgoto doméstico e efluentes, em geral sem tratamento prévio, capaz de afetar os usos múltiplos da água devido à poluição hídrica (GOMES et al., 2006). De acordo com a ANA (2019 d) a proporção de águas residuais tratadas de forma segura no Nordeste foi de 48,7% em 2016, abaixo apenas da região Norte. Na região hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental (AOR) foi observado o menor índice do país (48%) em relação à proporção de corpos hídricos com boa qualidade da água em 2015 (ANA, 2019d). O Quadro 1 traz alguns poluentes encontrados nos corpos hídricos e seus efeitos.

Quadro 1 - Efeitos da poluição da água para diferentes tipos de poluentes

Poluentes	Efeitos	Observações
Esgotos domésticos e efluentes de criações animais	Aumento da <i>Escherichia coli</i> e turbidez da água	Indica contaminação fecal, determinando o potencial da água transmitir, doenças, compromete os usos da água mesmo com tratamento de esgoto
Resíduos orgânicos	Aumento da DBO na água e conseqüente redução do oxigênio dissolvido	Se o oxigênio está disponível, essas substâncias podem ser degradadas por microrganismos. Se o oxigênio diminui, a decomposição é limitada aos decompositores anaeróbios
Compostos inorgânicos e minerais	Aumentam a salinidade e acidez da água, tornando-a tóxica	Algumas moléculas podem ser removidas durante o tratamento de efluentes
Compostos orgânicos sintéticos (agrotóxicos, detergentes, plásticos e outros resíduos)	Alteração na condutividade da água, causam má formação em recém-nascidos, câncer, danos ao sistema nervoso, e outras enfermidades.	Essas substâncias são raramente biodegradáveis, podendo ser removidas por meios físicos e químicos. Ocorre biomagnificação de seus efeitos via cadeia alimentar
Nutrientes em excesso (nitrogênio e fósforo)	Crescimento excessivo de plantas aquáticas e algas, odor indesejável e gosto ruim na água para consumo humano, aceleram o processo de eutrofização	A remoção do excesso de fosfatos e nitratos da água, durante o tratamento é caro e difícil. Mas, alternativas como utilização de macrófitas aquáticas em sistemas de <i>Wetlands</i> vem sendo aplicadas para manejo em corpos hídricos.
Sedimentos provenientes da erosão do solo	Aumento da turbidez, assoreamento dos cursos de água e obstrução de equipamentos hidroelétricos próximos às barragens, reduzem a zona fótica na coluna de água e o oxigênio dissolvido	O desmatamento e as práticas agrícolas inadequadas levam a condições de erosão do solo. O aporte de nutrientes provenientes da erosão do solo torna os corpos hídricos ricos em nutrientes com efeito na reprodução de espécies e alteração da qualidade da água.

Fonte: Adaptado de Vasco (2011) e ANA (2019c).

Dados observados em corpos hídricos no Nordeste brasileiro destacam que as concentrações de fósforo na água são preocupantes, com risco de eutrofização e prejuízos aos usos prioritários da água (ANA, 2019c; ANA, 2020c; ANA, 2021b). Outros parâmetros como condutividade e turbidez, geralmente em açudes de usos múltiplos, se apresentam relativamente elevados em comparação com outras regiões do país (ANA, 2019c). É corriqueiro observar a retirada de espécies nativas para a utilização das áreas desmatadas nas atividades de agricultura e essas regiões ficam propícias ao assoreamento, que contribuem para aumento da turbidez e da concentração de nutrientes na água (MORAIS et al., 2014; SILVA et al., 2014; WU et al., 2014).

A fim de estimar os impactos dos níveis de concentração de nutrientes na qualidade da água, a capacidade de autodepuração e a produtividade nos corpos hídricos, alguns índices como, o índice de Qualidade da Água (IQA) e o Índice de Estado Trófico (IET), que vêm sendo aplicados para diagnosticar e classificar as condições de qualidade da água e seu grau de trofia (LAMPARELLI, 2004; CARVALHO et al., 2011). O emprego desses índices tem sido

amplamente discutido em estudos de avaliação da qualidade da água para subsidiar medidas de gestão dos recursos hídricos (BUCCI e OLIVEIRA, 2014; SOUZA et al., 2018; NOORI et al., 2019; DASH; KALAMDHAD, 2021; UDDIN et al., 2021).

Na região Nordeste, o regime hidrológico tem papel relevante na dinâmica da concentração dos nutrientes e na qualidade da água (AESAs, 2019; CAVALCANTE et al., 2021). Em períodos de escassez hídrica no semiárido, destacando os anos de 2013 a 2016, a diminuição do volume de água acumulado nos reservatórios da região contribuiu para redução da qualidade da água (AESAs, 2019), com consequências na elevação das concentrações de fósforo e de condutividade, devido à estiagem prolongada e altas taxas de evaporação (ANA, 2019c).

Estudos como os de Barbosa et al. (2006); Barbosa et al., (2016) e Gomes et al. (2016), avaliando a qualidade da água em reservatórios no semiárido paraibano, constataram que o aumento na concentração dos sólidos dissolvidos totais e do fósforo foram provenientes da redução do volume hídrico no período de estudo, além de contribuírem para acentuar a perda da qualidade da água.

Os reservatórios da região semiárida são potencialmente mais suscetíveis à eutrofização, por apresentar maior tempo de residência da água e concentração de fósforo (WIEGAND et al., 2016). A eutrofização das águas prejudica os usos múltiplos nos corpos hídricos, principalmente por propiciar o desenvolvimento de florações de cianobactérias, grupo da comunidade fitoplanctônica que possui espécies potencialmente produtoras de cianotoxinas, (DI BERNARDO et al., 2010; RAMOS et al., 2016; CARDOSO et al., 2017a).

As cianotoxinas são metabólitos secundários bioativos nocivos à saúde humana e animal, capazes de gerar efeitos hepatotóxicos, neurotóxicos, citotóxicos e dermatotóxicos, e vêm sendo relatadas em reservatórios no semiárido nordestino (RAMOS et al., 2016; CARDOSO et al., 2017c; SILVA et al., 2019; SILVA et al., 2020). As cianotoxinas podem estar relacionadas a mecanismos de defesa do fitoplâncton, assim como auxiliando-os na competição por luz e nutrientes no ecossistema aquático (SILVA et al., 2020).

O fitoplâncton é considerado bom indicador de mudanças ambientais e impactos antrópicos, sendo possível aferir se um corpo hídrico foi ou não afetado por algum poluente, por meio da distribuição e dinâmica das espécies no ecossistema aquático, observando presença ou ausência de cada grupo da comunidade fitoplanctônica, bem como da sua quantidade no meio aquático (SHOUBAKY, 2013). Segundo Bittencourt-Oliveira (2014), mudanças climáticas e degradação da qualidade da água têm proporcionado condições ecológicas para o

desenvolvimento de determinados grupos da comunidade fitoplanctônica, como as cianobactérias.

Rêgo et al (2016), trazem dados preocupantes sobre a qualidade de água do reservatório Epitácio Pessoa, fornecidos a partir de monitoramento de cianobactérias realizado pela Companhia de Águas e Esgotos da Paraíba (CAGEPA), nos primeiros quatro meses de 2016. A densidade de cianobactérias observada apresentou resultados acima do limite recomendado pela Resolução CONAMA 357/05, e ainda, de acordo com a mais recente Portaria de Consolidação nº 5 de 28 de setembro de 2017, atualmente haveria necessidade de análise de cianotoxinas na água do manancial, no ponto de captação, com frequência semanal, por apresentar densidade superior a 20.000 células.ml⁻¹ (BRASIL, 2005; 2017).

Os dados do monitoramento citado acima mostraram ocorrência das cianotoxinas microcistina, saxitoxina e cilindrospermopsina, mas as concentrações encontradas na água do reservatório estiveram abaixo do limite máximo recomendado para os padrões de potabilidade. No entanto, a presença das cianotoxinas na água, no ponto de saída da Estação de Tratamento de Água (ETA), chama atenção para os potenciais riscos à saúde pública (RÊGO et al., 2016).

Em geral, pesquisas vêm relatando presença de cianobactérias potencialmente produtoras de toxinas em diversos reservatórios de usos múltiplos no semiárido, incluindo a bacia do rio São Francisco (MASCARENHAS et al., 2011; CARDOSO et al., 2017a; NOGUEIRA DA SILVA, 2019). Importante nesta análise, uma vez que, o rio Paraíba receberá águas do rio São Francisco através do Eixo Leste do PISF.

Estudos vêm discutindo os impactos que a integração entre diferentes bacias hidrográficas pode ocasionar na qualidade da água, desde impactos positivos como a redução nas concentrações de nutrientes disponíveis na coluna de água (LI et al., 2013; ZENG et al., 2015; MAMEDE et al., 2018; ZANG et al., 2018; CAVALCANTE et al., 2021), como negativos, com a introdução de espécies exóticas nas bacias receptoras (MENDES et al., 2018; RAMOS et al., 2021). No caso da bacia do rio Paraíba, espera-se que as águas que serão bombeadas do São Francisco, que em geral possuem boa qualidade, associadas a outras ações de manejo dos lançamentos, contribuam com a diluição de nutrientes na coluna de água e, conseqüentemente, na melhoria da qualidade da água na bacia receptora.

As águas das bacias integrantes do PISF necessitam tanto de quantidade disponível como de boa qualidade para garantia de seus usos. Interferências naturais do clima e antrópicas como lançamento de esgoto e efluente sem tratamento, poluição difusa através da irrigação, falta de acesso adequado aos serviços de esgotamento sanitário pela população, são agravantes para as alterações na qualidade da água e eutrofização (OECD, 2015). Assim, a gestão eficiente

da alocação e qualidade da água é preponderante para uso sustentável deste valioso recurso e melhoria da qualidade de vida da população.

2.2 EXPERIÊNCIAS DE INTEGRAÇÃO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS

Diversas estratégias vêm sendo desenvolvidas e aplicadas para combater a escassez hídrica ou aumento da demanda de água com o crescente desenvolvimento da sociedade. Entre essas estratégias, os projetos de integração ou transposição, que se definem por projetos onde águas de uma bacia hidrográfica são transferidas para outras com intuito de amenizar ou resolver problema de escassez hídrica na bacia receptora, são relatados no mundo inteiro (AZEVEDO et al., 2005; CAÚLA; MOURA, 2006; KHAN, 2008; ZHUANG, 2016; ZHAO et al., 2017; SHUMILOVA et al., 2018; LHWC, 2019; US BUREAU OF RECLAMATION, 2019).

Desde a antiguidade o homem vem realizando intervenções sobre os recursos hídricos, com relatos de experiências no antigo Egito e na Mesopotâmia, dos rios Tigre, Eufrates e Nilo (CAÚLA; MOURA, 2006; MI, 2018). Atualmente, projetos como o do canal El-Salaam no Egito, conta com a construção de uma adutora de 150 km para transportar água de sistema de esgotos misturada à água do rio Nilo para o rio Sinai (MI, 2018).

Os chineses também possuem experiência em implantação de projetos de transposição de bacias, responsáveis por transpor águas no rio Amarelo (CAÚLA, 2006; ZHAO et al., 2017). No entanto, a bacia do rio Amarelo, importante polo de produção alimentícia na China, vem enfrentando crises de escassez hídrica (ANDERSON, 2002). Na China também foi projetado um dos maiores planos de transposição de bacias do mundo, um megaprojeto que irá transferir águas da bacia do rio Yangtzé para a planície Norte da China, levando as águas da região sul, com abundante disponibilidade de água, ao Norte do país, caracterizado pela escassez hídrica e frequentes inundações (CAMPOS, 2005; ZHAO et al., 2017).

Outra intervenção internacional que se destaca foi a realizada entre Estados Unidos e Canadá, a transposição do rio Colorado, um dos rios mais regulamentados do mundo, para o rio Big Thompson, contando com um conjunto de 12 reservatórios interligados por túneis e canais (ANDERSON, 2002), desviando cerca de 320 milhões de metros cúbicos de água por ano e com finalidade inicial para irrigação agrícola, mas atualmente atende demandas de abastecimento público e industrial, geração de energia elétrica e recreação (US BUREAU OF RECLAMATION, 2019). Concluído após 21 anos do início das obras, com custo em torno de

1,4 bilhões de dólares, passou por diversos problemas técnicos ambientais, conflitos pelos usos da água, risco à vida de espécies de aves e à comunidade aquática (FERREIRA, 2016).

Na Austrália, entre 1949 e 1974, ocorreu a construção do projeto de transferência da bacia do rio Snowy para a bacia do rio Murray, com finalidade de uso para geração de energia, irrigação e abastecimento de água, capacidade para transpor 1,13 bilhão de m³ de água por ano, contando com uma infraestrutura de 16 reservatórios, sete usinas hidrelétricas, uma estação de bombeamento, túneis e aquedutos (ZHUANG, 2016).

No continente europeu, o aqueduto Tejo-Segura, na Espanha, com extensão total de 242 km, transfere água da bacia do rio Tejo, no Centro-Sul, para a bacia do rio Segura, região seca no Sudeste da Espanha. Este projeto teve início em 1933 e finalizou em 1973, apresentando problemas de salinização do solo, e devido à forte pressão de demanda hídrica, novos projetos de transposição foram necessários (CAÚLA; MOURA, 2006; MI, 2019).

Grandes projetos também podem ser observados entre a África do Sul e o Lesotho, com transferência de águas aproximadamente 950 milhões de m³ de água do rio Senqu no Lesotho para o rio Orange, contando com quatro hidrelétricas, adutoras e túneis localizados na fronteira entre os dois países, levando 19 anos para conclusão da Fase I (1983 a 2003) (LHWC, 2019).

No Peru, o Projeto Especial Chavimochic, que leva água para regiões mais elevadas, dos rios localizados nas proximidades da costa norte do Peru, com duração de 10 anos para conclusão (MI, 2018).

No Brasil, não há ocorrência de obras de grande porte de transposição de bacias, as mais relevantes são as ocorridas em bacias hidrográficas no Rio de Janeiro e em São Paulo. No Rio de Janeiro, foram transpostas as águas da bacia do rio Paraíba do Sul e Pirai para abastecer a Região Metropolitana, ressaltando que a vazão transposta desses rios para o rio Guandu pode chegar até 180 m³ s⁻¹, comprometendo 63% da vazão total deles. O mesmo acontece em São Paulo, onde o rio Piracicaba (33 m³ s⁻¹), através do Sistema Cantareira, foi transposto com intuito de complementar o abastecimento da Região Metropolitana do referido estado, retirando 78% da vazão do rio (CAMPOS, 2005).

Outros empreendimentos de menor porte foram realizados no Nordeste, um na Bahia, com objetivo de complementar o abastecimento de Salvador, com águas provenientes da barragem de Pedra do Cavalo, no rio Paraguaçu; outra em Pernambuco, para complementação do abastecimento de Recife, através do complexo da barragem de Pirapama; e no Ceará, com a integração de bacias hidrográficas através de uma série de interligações de açudes e canais, a fim de reforçar o abastecimento da Região Metropolitana de Fortaleza, suprir o Complexo

Industrial e Portuário do Pecém, propiciar o surgimento de um novo polo de desenvolvimento hidroagrícola nas áreas de tabuleiros da bacia do rio Jaguaribe e atender ao abastecimento humano das comunidades do entorno do projeto (CAMPOS, 2005).

Nesse contexto, verifica-se que a transposição de bacias hidrográficas é uma experiência antiga que vem sendo realizada para resolver problemas de déficit hídrico, o que possibilita análise dos aspectos positivos e negativos. Caldas et al. (2020) destacam que, em geral, os impactos provenientes da transferência de águas entre bacias hidrográficas são implicações de ordem ambiental, tais como físicas, químicas, biológicas, hidrológicas e ecológicas nos ecossistemas envolvidos, e implicações de ordem política, econômica, social e cultural.

Entre os principais impactos observados nas bacias hidrográficas doadoras em projetos de transferência de águas, destacam-se os impactos positivos como auxílio no controle de inundações, e negativos como possibilidade de perdas de oferta e qualidade nos serviços básicos relacionados (água, energia, saúde etc.), alterações hidrológicas, alteração da disponibilidade hídrica, comprometimento da qualidade da água devido à redução da capacidade de diluição e intrusão salina no estuário e aridificação (ZHUANG, 2016; CALDAS et al., 2020; CALDAS, 2021).

Os impactos positivos nas bacias receptoras se distinguem pela redução do afundamento do solo causado pela superexploração das águas subterrâneas, contribuição para o desenvolvimento regional, melhoria da diluição dos nutrientes na água contribuindo para melhoria da qualidade da água, sustentabilidade nas atividades agrícolas e hidrelétricas, melhoria dos serviços ambientais (vazão ecológica, drenagem, preservação de fauna e flora ameaçadas etc.), melhoria no abastecimento urbano e industrial, no desenvolvimento de atividades como pesca artesanal, aquicultura, irrigação e turismo, e ampliação de habitat para animais em extinção (ZHUANG, 2016; CALDAS, 2021).

Já os impactos negativos nas bacias receptoras podem estar relacionados às perdas de água por lixiviação, evaporação, contaminação; aporte de elevados níveis de nutrientes; erosão nos rios receptores; alterações ecológicas devido à importação de espécies exóticas; propagação de poluição e doenças; consequências do uso e ocupação do solo inadequado, sobretudo em áreas agrícolas, causando desmatamento da mata ciliar; desperdício dos recursos hídricos e aumento do consumo de água (ZHUANG, 2016; CALDAS, 2021).

É notável a importância para o desenvolvimento econômico e social que um empreendimento desta magnitude pode proporcionar em regiões de escassez hídrica, mas em geral, possuem um elevado custo e tempo para conclusão das obras, além dos diversos impactos

sociais e ambientais que acarretam. Portanto, a forma como será gerenciada a água é primordial para que os objetivos desses projetos sejam alcançados e assegurados de maneira justa e sustentável.

2.3 PROJETO DE INTEGRAÇÃO DO RIO SÃO FRANCISCO COM BACIAS DO NORDESTE SETENTRIONAL

Desde o período do Brasil-Colônia sabe-se que a idealização da transposição das águas do rio São Francisco existe, com relatos da época do reinado de Dom Pedro II. O Projeto já passou por diversos governos, mas sua construção teve início em 2007 e a operação parcial em 2017, com a conclusão do Eixo Leste.

A bacia do rio São Francisco com mais de 2.700 km de extensão corresponde a 73% da oferta hídrica superficial nordestina, com vazão média anual de $2.980 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, o que corresponde a uma descarga média anual da ordem de 94 bilhões de m^3 . Nasce na Serra da Canastra, em Minas Gerais, e estende-se pelos estados da Bahia, Pernambuco, Sergipe e Alagoas, dividido em quatro regiões fisiográficas (Alto, Médio, Submédio e Baixo), passando por cerca de 521 municípios (SOARES, 2013).

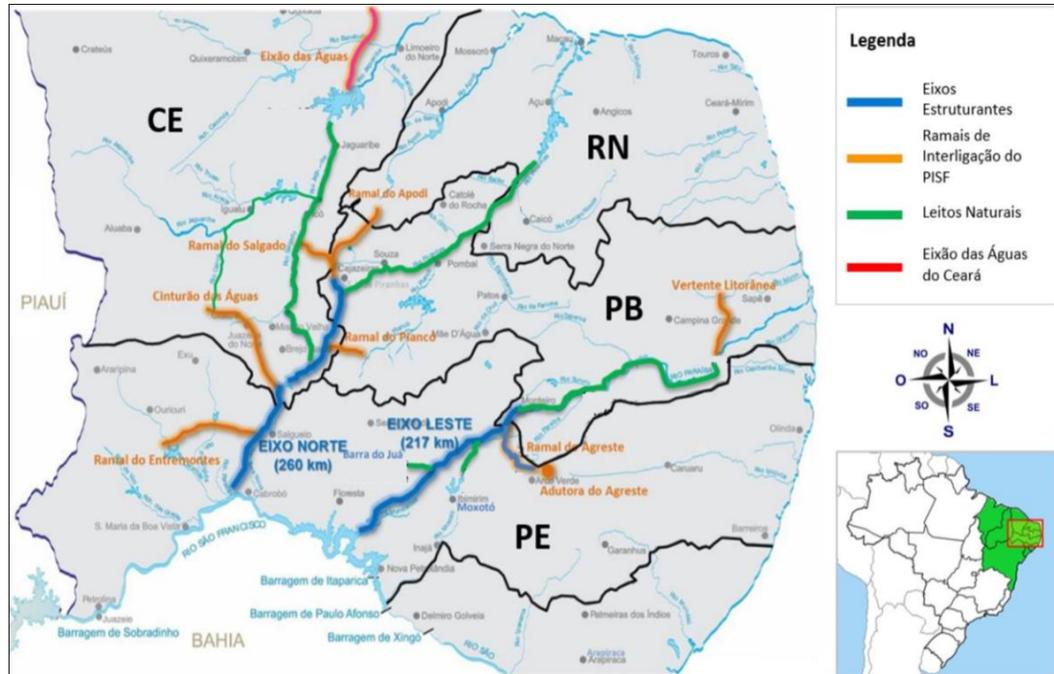
Em seu curso foram realizados diversos barramentos para usos múltiplos da água, como geração de energia hidrelétrica, abastecimento público, dessedentação animal, irrigação, piscicultura, pesca artesanal, navegação, turismo e lazer. O reservatório Itaparica, no trecho Submédio São Francisco, na margem pernambucana, é local de captação de água que abastece o Eixo Leste do PISF.

A construção das barragens na bacia hidrográfica do rio São Francisco gerou inúmeras possibilidades de desenvolvimento econômico, mas modificou seu regime de lótico para lântico, acarretando inúmeros impactos negativos, sejam de cunho social, como a realocação da população diretamente afetada pela construção dos reservatórios, e no ecossistema aquático, além de interferir na navegabilidade e em atividades econômicas como a pesca artesanal (CARDOSO, 2017b).

Atualmente, o PISF é a principal estratégia para minimizar os problemas de escassez hídrica no semiárido nordestino e tem como uso prioritário o consumo humano e a dessedentação animal. É formado pelos Eixos Leste e Norte (Figura 4 e Figura 5), e associado ao eixos, encontram-se em construção ou ainda como propostas para aproveitamento da água,

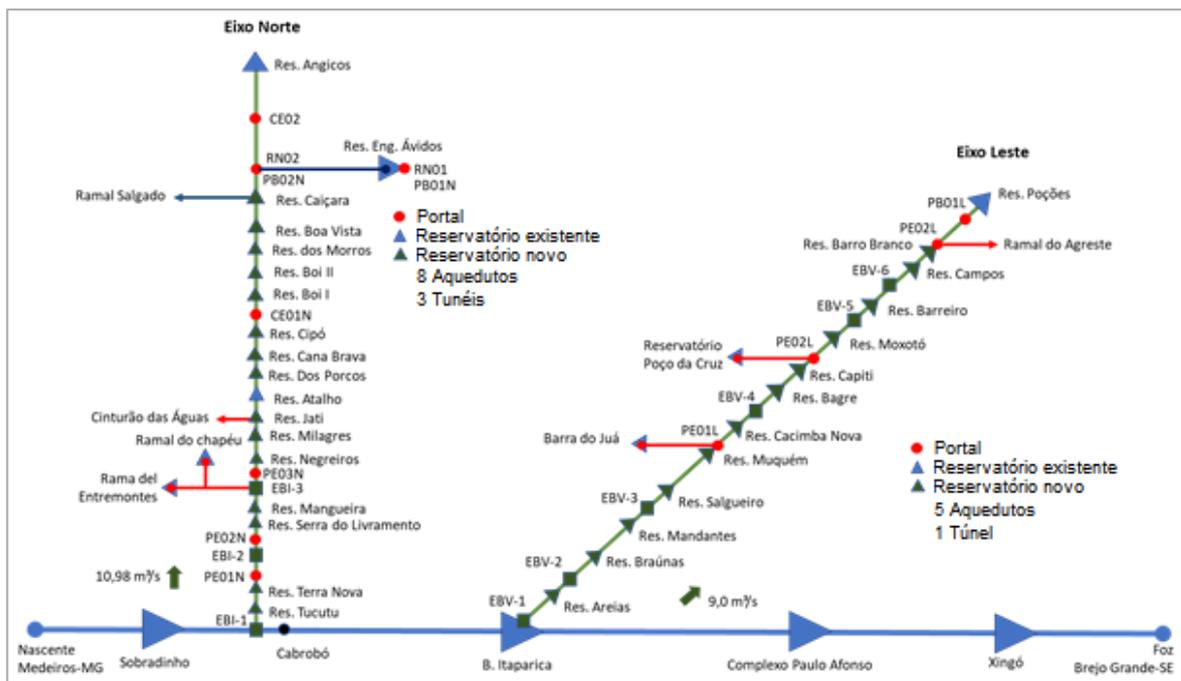
um conjunto de projetos definidos como Ramais, cujo objetivo é o desenvolvimento regional (ANA, 2015; 2019).

Figura 4 – Infraestrutura hídrica do Projeto de Integração do Rio São Francisco com as bacias do Nordeste Setentrional



Fonte: Portela (2021).

Figura 5 - Diagrama unifilar da infraestrutura do PISF nos Eixos Norte e Leste, com sistema dos novos reservatórios



Fonte: Mélo-Junior (2021).

O Eixo Norte percorre 400 km a partir da cidade de Cabrobó (PE), levando águas do rio São Francisco até as bacias dos rios Salgado e Jaguaribe, no Ceará, Apodi no Rio Grande do Norte e Piranhas-Açu nos estados da Paraíba e Rio Grande do Norte (Figura 4 e Figura 5). Este eixo foi projetado para uma capacidade máxima de $99 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e vazão contínua de $16,4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, contando com 17 novos reservatórios, mas apenas parte das obras desse trecho foi inaugurada em 2020, levando águas do rio São Francisco ao Ceará (CASTRO, 2011; BRASIL, 2019)

O Eixo Leste, encontra-se em operação desde 2017, percorre 220 km desde o município de Floresta – PE, com captação de água no reservatório Itaparica, até Monteiro - PB, contando com 13 novos reservatórios, abastecendo os dois Estados. As águas que chegam na Paraíba seguem para os reservatórios Poções, Camalaú e Eptácio Pessoa (Boqueirão), no Alto Curso do rio Paraíba, até chegar no reservatório Argemiro de Figueiredo (Acauã), no Médio Curso do rio Paraíba. Este eixo foi projetado para atender a capacidade máxima de $28 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e vazão contínua de $10 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Parte da vazão dará atendimento às demandas da região Agreste de Pernambuco, por meio do Ramal do Agreste, um ramal de 70 km que atravessa as bacias dos rios Moxotó e Ipojuca (CASTRO, 2011; BRASIL, 2019).

Segundo Farias et al. (2017), o sistema de açudagem dentro do PISF permite garantir reserva de água, sobretudo no período de estiagem, pois por meio dos reservatórios pode-se armazenar água no período chuvoso e com isso garantir o abastecimento no período de escassez, ajudando a diminuir a diferença na sazonalidade da oferta hídrica. O sistema de adutoras fechadas que viabilizam o transporte da água, ajuda na diminuição da perda de água por evaporação devido às altas temperaturas. Esses autores analisaram as perdas e cenários de desempenho de distribuição da água, no Eixo Leste do PISF, e concluíram que o sistema de adutoras é eficiente na redução das perdas hídricas e aumenta o ganho social através do aumento da população beneficiada.

Aragão (2008) aborda em sua pesquisa benefícios listados pelo extinto Ministério da Integração que ocorreram com a integração das bacias do PISF para o estado da Paraíba, entre eles destacam-se: o aumento da garantia da oferta hídrica proporcionada pelos maiores reservatórios estaduais (Eptácio Pessoa, Acauã, Engenheiro Ávidos), responsáveis pelo suprimento de água da maior parte da população das bacias do Paraíba e Piranhas; a redução dos conflitos existentes nas bacias do rio Paraíba sobre as águas do reservatório Eptácio Pessoa, e do Piranhas-Açu, entre usuários de água deste estado e do Rio Grande do Norte; melhoria na distribuição da água ofertada pelos açudes Coremas e Mãe D'Água; abastecimento seguro para 2,5 milhões de pessoas até 2025; e a perenização dos rios Paraíba e Piranhas.

Já os impactos adversos são na sua maioria de ordem ambiental, com evidência para o desmatamento, fragmentação de áreas de vegetação nativa e perda de habitats para a fauna em cerca de 430 ha no trecho Leste, modificação da qualidade da água e da comunidade aquática em algumas bacias receptoras, com aporte de nutrientes e introdução de espécies alóctones da bacia do São Francisco, modificação do regime fluvial pela transformação de rios intermitentes em rios perenes, com alteração do comportamento hidrossedimentológico nos rios receptores; e realocação, reassentamento ou desapropriação da população diretamente atingida pela construção de canais e reservatório, entre outros (CAMPOS, 2005; SOARES, 2013).

Vale destacar o risco da introdução de espécies exóticas invasoras presentes na bacia do rio São Francisco, como o molusco bivalve *Limnoperna fortunei* Dunker, 1857, conhecido popularmente como mexilhão dourado, introduzido no Brasil via água de lastro na década de 1990, o dinoflagelado *Ceratium furcoides* (levander) langhans 1925 e o peixe *Oreochromis niloticus* Linnaeus, 1758, mais conhecido como tilápia do Nilo, amplamente criado em sistema de piscicultura no reservatório Itaparica (CARDOSO, 2017b;c; CARDOSO et al., 2019; NOGUEIRA SILVA, 2019). Estas espécies podem se estabelecer nas bacias receptoras causando impactos ambientais na biota aquática endêmica.

Com finalidade de minimizar e compensar possíveis impactos negativos, bem como potencializar os benefícios sociais e ambientais do empreendimento, contemplado dentro do processo de obtenção da Licença Prévia – LP 200/2005, expedida pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), foram solicitados Programas Básicos Ambientais (PBA). Estes totalizaram 38 PBA e 62 condicionantes, divididos em 4 grupos: estratégicos ou de ampla articulação (3 PBA), meio físico (8 PBA), meio biótico (9 PBA) e meio antrópico (11 PBA).

Entre eles, 8 terão continuidade durante a operação do PISF, destacando os do meio biótico: PBA 20 - Monitoramento de vetores e hospedeiros de doenças, PBA 22 – Monitoramento da Qualidade da Água e Limnologia, PBA 23 - Conservação da Fauna e da Flora; PBA 37 - Programa de Monitoramento, Prevenção e Controle de Incêndios Florestais na Faixa de Servidão e PBA 38 - Programa de Corte e Poda Seletiva da Vegetação. A última licença concedida ao Eixo Leste foi a Licença de Operação nº1464/2018, com validade de dez anos.

Dada à dimensão do projeto, sua gestão está cunhada de forma participativa, integrada e descentralizada. O Ministério da Integração Nacional coordenou os processos de instalação e início de operação do PISF, e desde início de 2019, após modificações ministeriais do Governo foi então renomeado Ministério do Desenvolvimento Regional. Nesta estrutura foi incorporada

a inclusão da ANA ao MDR, que anteriormente estava alocada no Ministério do Meio Ambiente (MMA). A ANA está no topo hierárquico da gestão das águas do projeto, como órgão regulador, e tem poder de designar aos órgãos estaduais gestores de recursos hídricos autoridade para desempenhar determinadas funções.

Entre os órgãos colegiados, o comitê de bacia hidrográfica, possui atribuições de caráter normativo, consuntivo e deliberativo, integrando o SINGREH. O Comitê de Bacia do Rio São Francisco (CBHSF) é atuante e foi importante ator nas fases iniciais do PISF. Ainda, na esfera estadual, os órgãos gestores exercem papel fiscalizador e as companhias de água e esgoto são responsáveis pela captação, tratamento, distribuição da água potável e tratamento e despejos de esgoto (FERREIRA, 2016). Como mencionado anteriormente, o operador federal do PISF é a Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba (CODEVASF).

As experiências alcançadas com a crise hídrica deixam como lição que sem planejamento integrado, com envolvimento da opinião pública, não há gestão sustentável dos recursos hídricos e nem tampouco garantia dos seus usos. Ações pautadas para evitar os desperdícios, perdas e subaproveitamento da água e potencializar o planejamento técnico, associado ao incentivo à promoção da Educação Ambiental nas comunidades, devem ser adotadas em todas as bacias integrantes do Projeto, que deve ser pensado de maneira sistêmica e integrada entre os Estados envolvidos. A revitalização da bacia do São Francisco deve ser prioridade, a sustentabilidade hídrica desta depende da proteção do ecossistema.

2.4 MODELAGEM MATEMÁTICA APLICADA AOS RECURSOS HÍDRICOS

Modelagem matemática se define por uma representação de determinado processo físico, químico ou biológico que ocorre dentro de determinado sistema ambiental, por meio de um conjunto de equações, da forma mais próxima possível da realidade (ANDRADE, 2005; ROSMAN, 2005).

Os modelos vêm sendo utilizados em muitos estudos na investigação para melhor aproveitamento do potencial dos corpos hídricos, sobretudo nos cenários de mudanças climáticas, de modo a garantir sustentabilidade, prever alterações futuras nos ecossistemas, auxiliar na tomada de decisão quanto a capacidade de suporte dos recursos hídricos e as condições da qualidade da água (ROUSTA & ARAGHINEJAD, 2015; MOHOR & MENDIONDO, 2017; NIAYIFAR & PERONA, 2017; ROOBAVANNAN et al., 2017; SHOURIAN & MOUSAVI, 2017; SILVA et al., 2017; LIMA et al., 2018).

As pesquisas sobre modelagem de recursos hídricos demonstram que o uso de modelos de simulação e otimização são apropriados para examinar, desde o desempenho de alternativas operacionais, a formulação de políticas públicas, pois os modelos permitem realizar uma representação mais próxima da realidade de um sistema hídrico e possibilita a simulação de um grande número de alternativas com confiabilidade e sob a influência de diversas variáveis, em um curto espaço de tempo (MÉLLO JUNIOR et al., 2005; MÉLLO JUNIOR et al., 2013; ALMEIRA e CURI, 2016; LIMA et al., 2018; ARAÚJO e OLIVEIRA, 2021).

Os modelos de simulação são capazes de representar um sistema real por meio de uma realidade computacional, com a finalidade de prever o comportamento desse sistema através de equações matemáticas e fornecer informações para avaliar suas operações (BRAGA et al., 1998). Com os modelos de otimização é possível determinar uma política ótima de operação, pois procuram a solução do problema de forma a atender aos objetivos estabelecidos para operação do sistema (PORTO et al., 2003; ARAGÃO, 2008).

Os modelos matemáticos atendem a diversas necessidades, desde modelos de avaliação da qualidade da água à modelos hidrológicos e climáticos. Ambos os tipos podem ser aplicados de maneira conjunta para obter os resultados desejados.

Segundo Von Sperling (2007), existem vantagens e limitações no uso dos modelos matemáticos, entre as principais vantagens destacam-se: capacidade de representar o lançamento de matéria orgânica e autodepuração do sistema, avaliar os impactos das cargas poluidoras, prevenir ou remediar a poluição hídrica, compreender e visualizar o meio ambiente de forma integrada e exibir grande número de alternativas em curto espaço de tempo. Entre as limitações evidenciam-se: dificuldade em formular matematicamente alguns processos, simplificação do comportamento espacial de variáveis e fenômenos, e especialmente, a carência de quantidade e qualidade de dados disponíveis.

Os dados de vazão dos corpos hídricos estão entre os utilizados para modelagem que mais se observam falhas, tanto em quantidade como em qualidade, e os métodos que propiciam o conhecimento direto da descarga líquida num intervalo de tempo são relativamente caros e têm medições demoradas (CARVALHO, 2014). Alguns estudos analisaram a confiabilidade dos dados disponibilizados pela ANA e chamaram atenção para quantidade de estações fluviométricas consideradas insatisfatórias, sem o fornecimento de séries históricas contínuas, tornando ainda maior o desafio da gestão e do monitoramento dos recursos hídricos no Brasil (VESPUCCI et al., 2016; PINTO et al., 2017).

Modelos hidrológicos podem ser utilizados para preenchimento de séries históricas, que por sua vez, podem ser utilizadas em modelos de qualidade da água, que necessitam

previamente da inserção de dados hidrológicos em seu sistema para realizar as simulações ou podem ocorrer de forma conjunta (BUENO et al., 2017).

O modelo hidrológico *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT), desenvolvido pelo Serviço de Pesquisa Agrícola (ARS) do Departamento de Agricultura (USDA) dos Estados Unidos em conjunto com a Texas A&M University, é comumente utilizado para se obter dados de vazão de corpos hídricos e tem como objetivos demonstrar a atuação dos fatores que influenciam as perdas de solo pela erosão hídrica, prever o impacto da produção de sedimentos e das cargas de poluentes em bacias hidrológicas, simulando os diversos processos no ciclo hidrossedimentológico (CARVALHO, 2014; BUENO et al., 2017).

A utilização dos modelos está vinculada aos diversos fins que variam de acordo com o objetivo que deseja ser alcançado. De acordo com Souza (2006), há algum tempo a utilização de modelos matemáticos como ferramenta de apoio a tomada de decisão vem sendo requisitada pelas autoridades fiscalizadoras do meio ambiente. Pois além de dar boas respostas para o gerenciamento dos recursos hídricos, possuem baixo custo operacional e ampla flexibilidade.

2.4.1 Modelos matemáticos de alocação e qualidade da água

Os modelos matemáticos de qualidade da água podem ser definidos como representações matemáticas dos processos físico-químicos e biológicos ocorridos no ambiente aquático, com base nas leis de conservação da massa, contabilizando os *inputs* e *outputs* e a cinética do sistema (JAMES, 1993). Muitos modelos integram qualidade da água a modelos de otimização e simulação de sistemas de reservatórios, sendo capazes também de apresentar soluções para a alocação de água e políticas operacionais para sistemas de reservatórios (PORTO et al., 2003).

A aplicação dos modelos de qualidade da água pode servir a variados estudos e ambientes, diferindo de acordo com o viés dos resultados esperados, entre eles os de curto prazo, possibilitando a criação de cenários futuros da qualidade de corpos d'água face às ações antrópicas ou climáticas, sejam em ambientes lóticos ou lênticos. Por isso o uso integrado do monitoramento ambiental e a modelagem matemática oferece bom custo-benefício em relação à utilização somente do monitoramento *in loco*, considerando a distribuição espacial e temporal da informação gerada, os impactos antrópicos e as demandas da bacia (SOUZA, 2006).

Em geral, os modelos matemáticos integrados de alocação e qualidade da água vêm sendo utilizados para simular o comportamento de parâmetros indicadores da qualidade da água de um corpo hídrico, de ordem físico-química e biológica, com objetivo de determinar a concentração máxima permissível de nutrientes que não ultrapasse o limite de autodepuração

do corpo receptor (VON SPERLING, 2007; SILVA, 2015; SILVA et al., 2017; LIMA et al., 2018; MAMEDE et al., 2018), combinado a solução de problemas de planejamento e gerenciamento quantitativo de recursos hídricos (TEIXEIRA, 2004; ARAGÃO, 2008; CARVALHO et al., 2009; VASCO, 2011; FARO e GARCIA, 2017; MÉLLO JUNIOR. et al., 2001), sendo considerados como um Sistema de Suporte à Decisão (PORTO et al., 2003).

Os modelos são capazes de simular ambientes de determinada tipologia, e poucos são próprios para simular a qualidade integrada à quantidade da água, em escala da bacia hidrográfica, considerando ambientes lóticos e lênticos (SALLA et al., 2014). O Quadro 2 traz alguns modelos que vêm sendo aplicados para simulação da alocação e qualidade da água.

Quadro 2 – Modelos matemáticos aplicados à simulação de alocação e qualidade da água em rios e reservatórios

Modelo	Parâmetros	Tipologia	Fonte	Trabalhos	Aplicações
AcquaNet	Fósforo, nitrogênio, amônia, nitrito, nitrato, demanda bioquímica de oxigênio (DBO), oxigênio dissolvido (OD), coliformes fecais, temperatura, clorofila- α , sólidos totais dissolvidos (módulo de qualidade), irrigação, alocação de água, fatores econômicos etc.	Aspectos quali-quantitativos da água	Labsid (USP)	Vasco (2011)	Modelagem quali-quantitativa da água na sub-bacia hidrográfica do rio Poxim/SE
AQUATOOL	Temperatura, sólidos suspensos, fósforo total, oxigênio dissolvido, matéria orgânica carbonácea, ciclo do nitrogênio, OD etc. (módulo GESCAL) e ferramentas de gestão de bacias hidrográficas (módulo SIMGES).	Aspectos quali-quantitativos da água	<i>Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia</i>	Salla et al. (2014)	Estudo na bacia hidrográfica do Rio Uberabinha/MG, para o planejamento e gerenciamento, incluindo modelo de quantidade e qualidade
AQUATOX	Tóxicos, matéria orgânica, sedimento, oxigênio dissolvido e seus efeitos nos peixes, invertebrados e plantas aquáticas.	Qualidade da água	<i>US Environmental Protection Agency</i>	Cassini (2011)	Análise de aspectos de qualidade da água na Baía de Vitória/ES, e consequências da poluição orgânica no ambiente estuarino.
CE_QUAL_W 2	Fitoplâncton, amônia, nitrito, nitrato, fósforo total, matéria orgânica, temperatura (total de 21 parâmetros)	Qualidade da água	<i>US Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station Environmen</i>	Martin et al. (2013)	Simulação para previsão do comportamento do OD no rio Athabasca, Canadá.

			<i>tal Laboratory</i>		
MIKE 11	OD, DBO, coliformes, nitrogênio, fósforo, metais, fitoplâncton, zooplâncton, demanda bentônica, irrigação, gerenciamento de inundações, previsões de enchentes, sistemas urbanos.	Aspectos quali-quantitativos das água	<i>Danish Hydraulic Institute</i>	Lucas et al. (2010)	Calibração do modelo para sub-bacia do rio Piauitinga/SE
MOHID	Temperatura, OD, DBO, nitrogênio, nitrogênio orgânico, nitrito, nitrato, fósforo total, fósforo inorgânico, fósforo orgânico, salinidade, fitoplâncton (clorofila-a)	Qualidade da água	Instituto Superior Técnico da Universidad e de Lisboa	Deus et al. (2013)	Análise dos padrões espaciais e temporais do fitoplâncton no reservatório Tucuruí/PA
QUALI-TOOL	Sólidos suspensos, OD, DBO, nitrogênio orgânico, amônia, nitrito, nitrato, fósforo total, coliformes fecais, <i>Escherichia coli</i> e metais pesados.	Qualidade da água	Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos do PPGE/UFU.	Alamy Filho et al. (2019)	Avaliação da qualidade da água em ambiente lótico.
QUAL_UFMG	DBO, OD, nitrogênio total, nitrito, nitrato, nitrogênio amoniacal e orgânico, fósforo orgânico e inorgânico, coliformes termotolerantes e <i>E. coli</i> .	Qualidade da água	Von Sperling (2007)	Silva (2015)	Modelagem da qualidade da água como suporte ao enquadramento da bacia do rio Goiana, PE
				Lima et al. (2018)	Modelagem da qualidade da água na bacia hidrográfica do Açude Acarape do Meio/CE
QUAL2E	OD, DBO, temperatura, fitoplâncton, amônia, nitrito, nitrato, nitrogênio orgânico, fósforo orgânico, fósforo dissolvido, coliformes etc.	Qualidade da água	<i>United States Environmental Protection Agency (USEPA) - 1985</i>	Oppa (2007)	Modelagem da qualidade da água como suporte ao enquadramento do rio Vacacaí Mirim/RS
				Zorzal (2009)	Qualidade da água em função da modelagem do lançamento de efluentes na sub-bacia do rio Santa Maria da Vitória/ES
SISBAHIA	OD, DBO, temperatura, fósforo inorgânico, fósforo orgânico, nitrogênio	Qualidade da água	Instituto Alberto Luiz Coimbra de	David et al. (2015)	Modelagem da capacidade de carga em reservatório na bacia do

	orgânico, amônia, nitrato, salinidade, zooplâncton e fitoplâncton (clorofila- α)		Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) da UFRJ		Alto rio Paraná para cultivo de tilápia do nilo
STREETER-PHELPS	DBO	Qualidade da água	1925	Bezerra et al. (2008)	Uso do modelo Streeter Phelps para desenvolvimento de programa com intuito de servir como ferramenta didática e de gestão da qualidade das águas.
SWIM	Dinâmica hidrológica, vegetação, erosão e fluxo de nutrientes, precipitação, evapotranspiração, percolação, escoamento superficial e escoamento subsuperficial para a coluna de solo.	Alocação de água	<i>Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK)</i>	Oliveira (2019)	Modelagem espaço-temporal e análise de cenários do uso da água para irrigação no trecho submédio da bacia hidrográfica do rio São Francisco.
WASP7	Nitrogênio, fósforo, OD, DBO, fitoplâncton, produtos químicos orgânicos, metais, mercúrio, coliformes, temperatura, salinidade, sílica, químicos orgânicos e pesticidas	Qualidade da água	<i>United States Environmental Protection Agency (USEPA)</i>	Wang et al. (2015)	Modelagem da carga de suporte diária (N e P) na bacia do Lago Taihu, China.

Fonte: A autora (2019).

2.4.2 Modelo AcquaNet

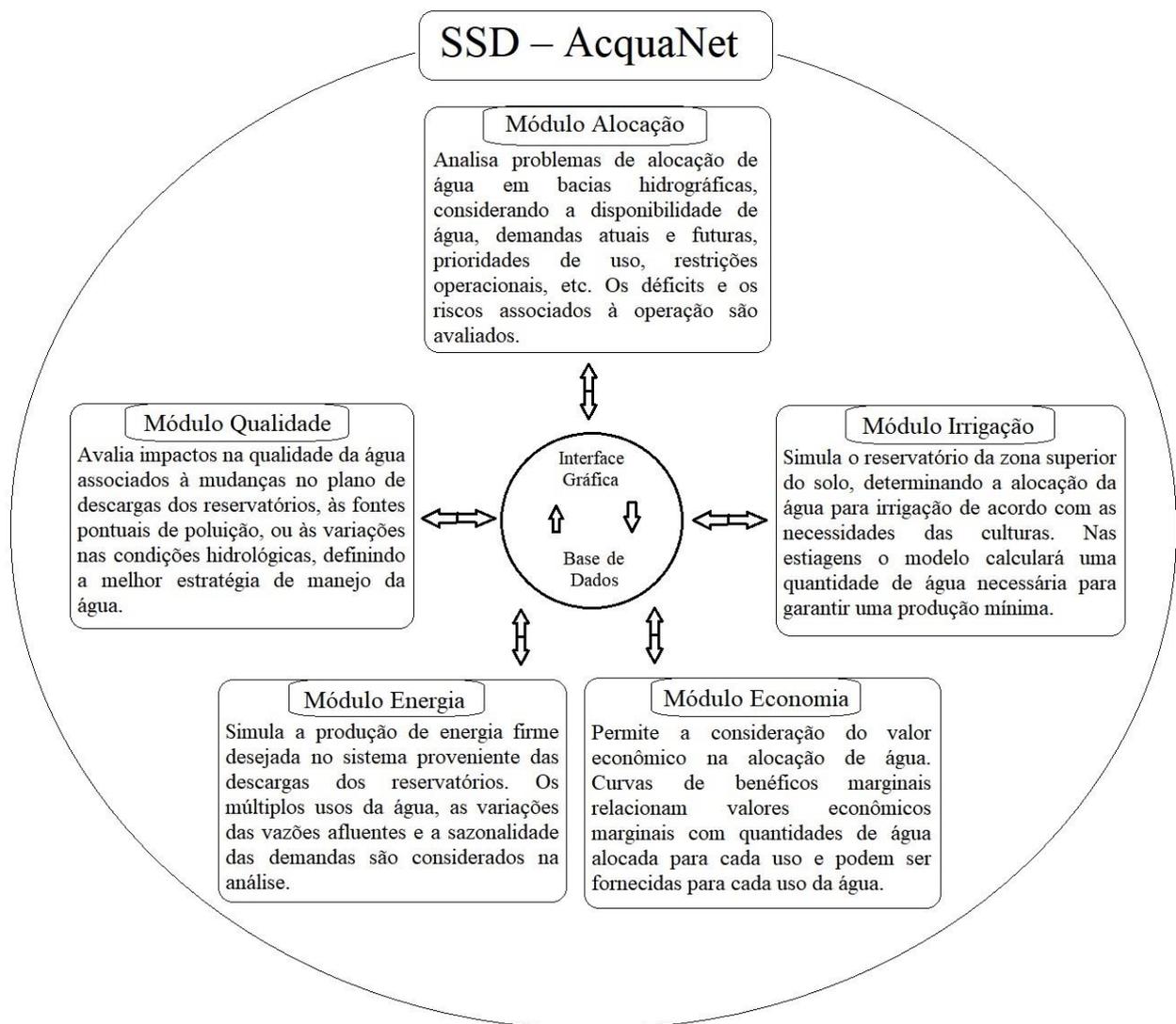
O Sistema de Suporte à Decisão (SSD) denominado AcquaNet é formado por um modelo de rede de fluxo para simulação de bacias hidrográficas, desenvolvido pelo Laboratório de Sistemas de Suporte à Decisões em Engenharia Ambiental e Recursos Hídricos (LabSid) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP), a partir da primeira versão chamada de MODSIM, desenvolvida por John W. Labadie no *Colorado State University* (CARVALHO et al., 2009; LUCENA, 2018).

O AcquaNet é um modelo de simulação que contém algoritmo de otimização para resolução de problemas de alocação de água em bacias hidrográficas sujeitas a restrições operacionais e prioridades de atendimento às demandas, através de algoritmo de balanço de massa para simulação, e de otimização de rede de fluxo eficiente, o *Out-of-Kilter* (PORTO;

AZEVEDO, 1997), que trabalha com programação linear primal-dual para minimizar o custo na rede e maximizar os benefícios no seu uso (SCHARDONG et al, 2009; FARO; GARCIA, 2017).

O modelo AcquaNet é formado por um módulo base e subdividido em módulos secundários para alocação de água, qualidade da água, alocação de água para irrigação, produção de energia elétrica, análise de valores econômicos nas decisões de alocação e curva de risco (Figura 6).

Figura 6 – Arquitetura do AcquaNet e as principais funcionalidades de seus módulos de análise



Fonte: Porto et al. (2003).

A representação dos sistemas no modelo se dá a partir de uma rede formada de nós e arcos, onde os nós representam reservatórios, demandas de cidades, indústria, agricultura, reversões, confluências e outros pontos do sistema, e os arcos são conexões entre os nós,

representando trechos de rio, adutoras, canais, túneis e trechos naturais ou artificiais de rios (FARO; GARCIA, 2017). Cada *link* possui um limite inferior e superior, como vazões mínimas e máximas e um custo de passagem estabelecido pelo usuário.

Os módulos escolhidos para o presente estudo foram os de alocação da água e de avaliação da qualidade da água. Estes, são adaptáveis e capazes de representar variados ambientes e problemas, permitindo que determinada bacia hidrográfica seja simulada utilizando entrada de dados adequadamente. No modelo é permitida representação de um curso hídrico complexo, com trechos lóticos, lênticos e canais artificiais, considerando as demandas, como retiradas para agricultura e abastecimento e as entradas, como afluentes e lançamentos de esgoto, sendo possível análise dos aspectos qualidade e quantidade de água, por meio de fórmulas de decaimento exponencial dos poluentes (TEIXEIRA, 2004).

Entre os principais dados de entrada temos os parâmetros: vazão, volume, cota/área, evaporação, retiradas (outorgas, licenças e etc); e para qualidade da água: fósforo, nitrogênio, amônia, nitrito, nitrato, demanda bioquímica de oxigênio (DBO), oxigênio dissolvido (OD), coliformes fecais, temperatura, clorofila- α e sólidos dissolvidos totais (TEIXEIRA, 2004). No AcquaNet, a otimização é executada em intervalo de tempo mensal.

A aplicabilidade do modelo AcquaNet vem sendo relatada em diversos trabalhos e em várias situações distintas como atendimento às demandas de usos múltiplos da água, avaliação da qualidade de água, impactos na geração de energia elétrica, análise da sinergia e sustentabilidade hídrica, cenarização de crises hídricas, entre outros.

Teixeira (2004) desenvolveu a partir do modelo AcquaNet, utilizando os módulos de qualidade e alocação, uma ferramenta computacional capaz de gerenciar de forma integrada a quantidade e a qualidade da água em uma bacia hidrográfica. Esse autor concluiu que o modelo é uma ferramenta versátil que pode ser aplicada em diversas bacias hidrográficas para o gerenciamento de recursos hídricos.

Lerner e Carpio (2006) realizaram simulação dos impactos energéticos nas usinas hidrelétricas localizadas na bacia do rio São Francisco, por meio do AcquaNet e concluiu-se que os impactos energéticos no rio variam proporcionalmente com a vazão demandada pela transposição. Ainda, ressaltaram que o modelo apresenta limitação de cálculo no que diz respeito às prioridades de atendimento das demandas, que são obedecidas rigidamente. E esse aspecto faz com que haja variações bruscas mensais no nível das águas dos reservatórios, fazendo com que as alocações consuntivas e de geração de energia sofram bastante alterações,

recomendando assim a introdução da lógica Fuzzi para tornar o modelo mais flexível quanto às prioridades de atendimento às demandas e com simulações mais próximas a realidade.

Aragão (2008) avaliou a sinergia hídrica no Eixo Leste do PISF a partir do AcquaNet e constatou que a utilização de adutoras torna mais eficiente e sustentável a transposição da bacia do rio São Francisco para o rio Paraíba, contribuindo para diminuir as perdas no sistema. Corroborando com as reflexões de Lerner e Carpio (2006), que também indicaram ajustes no modelo AcquaNet em relação à flexibilidade da alocação hídrica com as prioridades de demanda.

Schardong et al. (2009) examinaram o desempenho do modelo na versão AcquaNetXL para alocação de água em sistemas hídricos e asseguraram que o modelo é eficiente em facilitar o entendimento e a formulação do problema de alocação de água em bacias hidrográficas. O AcquaNetXL é uma alternativa mais simples e flexível para ser utilizada pelo usuário do AcquaNet.

Carvalho et al. (2009) estudaram a alocação de água em projetos de irrigação na bacia do rio Itapicuru - BA por meio do módulo de análise IrrigaLS do AcquaNet. O modelo foi apto para simular o sistema de estudo sob a análise da alocação de água, oferecendo informações úteis para o planejamento e a tomada de decisão, calculou a demanda para irrigação considerando a sazonalidade, quantidades ótimas de água para as culturas, a necessidade hídrica real da planta e o efeito do déficit hídrico na produção.

Vasco (2011), utilizando o AcquaNet, realizou modelagem quali-quantitativa da água na sub-bacia hidrográfica do rio Poxim - SE considerando o uso e ocupação do solo. O autor enfatizou que apesar da curta série de dados, o modelo se configurou como ferramenta útil na tomada de decisão para o gerenciamento dos recursos hídricos em questão.

Medeiros et al. (2015) avaliaram o comportamento do sistema de reservatórios de usos múltiplos na bacia do rio Seridó - RN e a partir do aplicação do modelo AcquaNet observaram que os reservatórios de estudo não atendem às demandas de forma satisfatória na maior parte do tempo. O modelo permitiu avaliar o atendimento às demandas de forma satisfatória aos objetivos do trabalho.

Faro e Garcia (2017) validaram o AcquaNet como ferramenta de simulação hidrológica para a avaliação de problemas complexos de alocação de água no Sistema Cantareira em São Paulo, assim como os estudos anteriores, relatando também que o modelo constitui uma importante ferramenta de Suporte à Decisão para problemas complexos de gerenciamento de recursos hídricos.

Lucena (2018) investigou a partir da cenarização da escassez hídrica ocorrida no semiárido paraibano de 2012 a 2017, quais ações poderiam ter sido tomadas para evitar o racionamento submetido à população atingida pela crise. Concluindo que o modelo AcquaNet é uma ferramenta útil na tomada decisão quanto à gestão de reservatórios em épocas de escassez hídrica no semiárido.

Tercini e Mélo Junior (2018) avaliaram o uso do AcquaNet para simulação da disponibilidade hídrica e atendimento às demandas de água, utilizando como estudo de caso a bacia hidrográfica do Rio Piranhas-Açu, e concluíram que o software AcquaNet é indicado para análise de diferentes cenários, considerando realizar simulação em lote para automatizar a tarefa, mas recomenda-se a incorporação de ferramentas que auxiliem a entrada de dados, que ainda consome tempo.

Esse modelo matemático foi escolhido como ferramenta para análise nesse estudo por se apresentar como alternativa eficiente e representativa das condições da região de estudo, com ocorrência de ambientes lótico e lêntico, por possuir acesso gratuito e já vem sendo aplicado à outras bacias hidrográficas no semiárido.

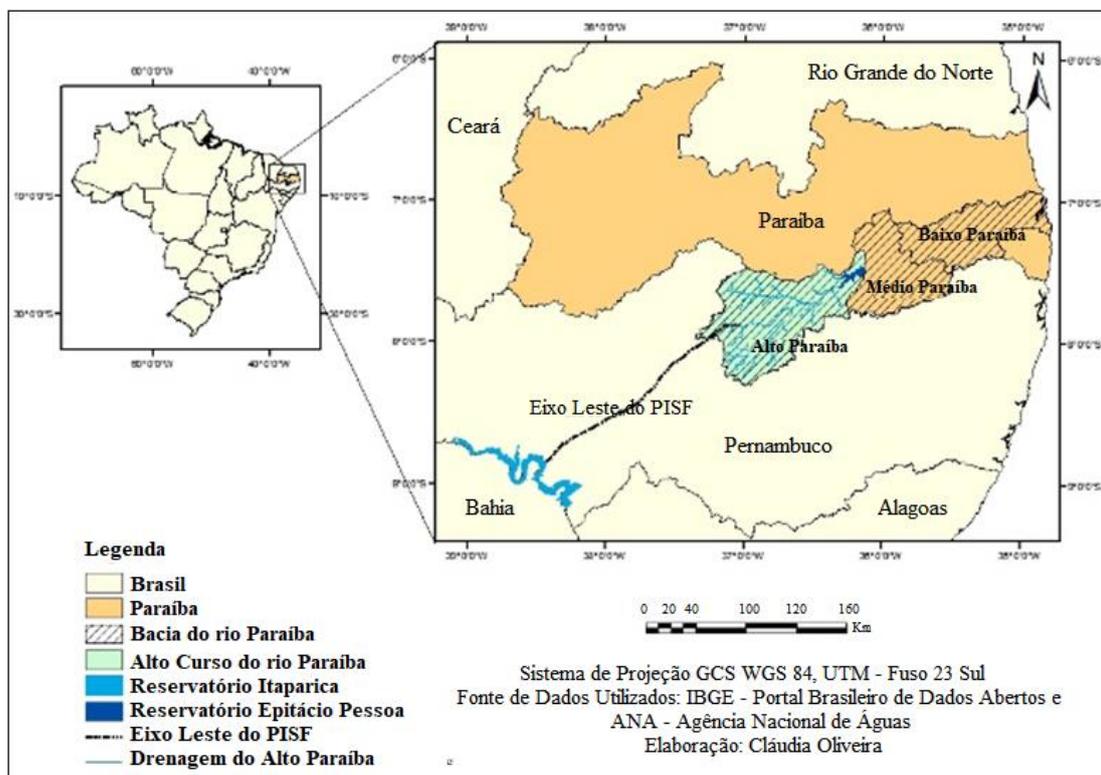
3 METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada a caracterização do ambiente de estudo, bem como as técnicas utilizadas para realização da pesquisa. Os procedimentos metodológicos realizados referem-se à análise das demandas de água outorgadas, a avaliação da qualidade da água com enfoque físico-químico e biológico e aos modelos simulados no AcquaNet para verificar o atendimento às demandas e a qualidade da água da água no Alto Curso do rio Paraíba.

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do rio Paraíba possui uma área de 20.071,83 km², correspondendo a 34% do território paraibano. Encontra-se inserida no Estado da Paraíba, drena totalmente ou parcialmente territórios de 85 municípios, com uma população total de cerca de 1.251.206 habitantes, representando 53% de toda população do Estado da Paraíba (PARAÍBA, 2006a; IBGE, 2010). Está dividida em regiões fisiográficas e estas são: sub-bacia do rio Taperoá, e Alto, Médio e Baixo Cursos do Rio Paraíba (PARAÍBA, 2001) (Figura 7).

Figura 7 - Localização geográfica da bacia hidrográfica do rio Paraíba/PB

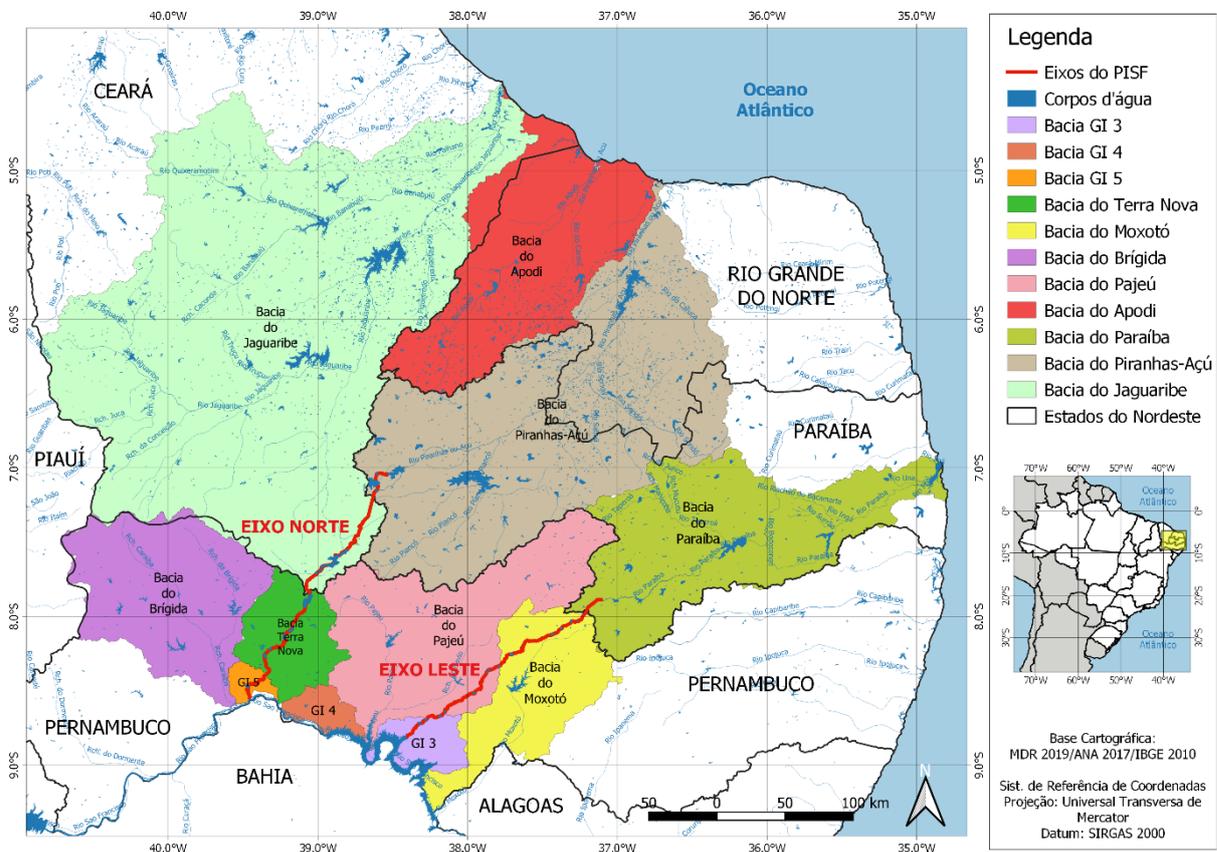


Fonte: OLIVEIRA (2018).

O rio Paraíba e seus afluentes abrangem importantes cidades como Monteiro, Queimadas, Campina Grande, Boqueirão, Sapé, Santa Rita e a capital João Pessoa (XAVIER et al., 2012). Ao longo da bacia foram construídos vários reservatórios públicos para abastecimento humano e animal, irrigação, pesca, lazer e turismo (PARAÍBA, 2001).

A bacia do rio Paraíba foi escolhida como área de estudo dentro do Eixo Leste (Figura 8), considerando o arranjo atual do Projeto de Integração e as bacias onde ocorrem os eventos de mistura e alteração da qualidade da água de acordo com o Plano Básico Ambiental (2005). Nesta pesquisa será considerada a região do Alto Curso do Rio Paraíba, abrangendo os reservatórios destinados a múltiplos usos.

Figura 8 – Mapa de localização do Eixo Leste do Projeto de Integração do Rio São Francisco com Bacias do Nordeste Setentrional



Fonte: CALDAS (2021).

Das águas do rio São Francisco captadas para o Eixo Leste no reservatório Itaparica, parte será conduzida até o reservatório Poço da Cruz, localizado no curso superior do rio Moxotó, também afluente do rio São Francisco. A água permanece na própria bacia do rio São Francisco, uma vez que as sub-bacias (Brígida e Moxotó) drenam para o próprio São Francisco. Em seguida, ocorre o primeiro evento de mistura de bacias, onde a bacia do rio Paraíba será alimentada com águas do rio São Francisco. Essas águas serão conduzidas através de canais e

armazenadas em reservatórios, Poções e Camalaú, sendo, por fim, lançadas no rio Monteiro, afluente da margem esquerda e principal formador do rio Paraíba, até chegar ao açude Epitácio Pessoa (Boqueirão) e Argemiro Figueiredo (Acauã) (BRASIL, 2004).

O Alto Curso do rio Paraíba, localizado integralmente no Estado da Paraíba, drena uma área de aproximadamente 6.717,39 km². Na margem esquerda os afluentes são os rios do Meio e Sucurú, e na margem direita recebe as contribuições dos rios Monteiro e Umbuzeiro (ARAGÃO, 2008). Abrange os municípios de Monteiro, Camalaú, Congo, São João do Cariri, Cabaceiras, Barra de São Miguel e Boqueirão.

Está situado numa região das mais secas do estado devido aos baixos índices pluviométricos e à má distribuição de chuvas, caracterizada pelo clima semiárido quente, do tipo BSw^h (classificação climática de Köppen), com a estação seca permanecendo de 8 a 10 meses e precipitação média anual variando de 400 a 600 mm. As temperaturas mínimas variam de 18 °C a 22 °C, entre julho e agosto, e máximas de 28 °C a 31 °C, entre novembro e dezembro, a evaporação anual varia entre 2500 e 3000 mm, e a umidade relativa do ar mensal é em torno de 60 a 75% (XAVIER et al., 2012; MOURA et al., 2013).

A vegetação predominante na região da bacia é caracterizada pela xerófila da Caatinga, com pequena espessura devido às condições climáticas da região (GOMES et al., 2017). Nas áreas desmatadas e utilizadas na agricultura vêm predominando as culturas de cebola, pimentão, milho, feijão, entre outras (ARAGÃO, 2008). A geologia da bacia é composta na maior parte por rochas cristalinas que compõem o Escudo Pré-Cambriano do Nordeste, compostas por quartzitos, gnaisses, migmatitos e micaxistos, com ocorrências de granitos originados de rochas vulcânicas e plutônicas (LACERDA, 2003).

Os solos predominantes na bacia do Alto Curso do rio Paraíba são do tipo Bruno não-cálcico, que cobrem todo o cristalino existente na área da bacia, grande parte é constituída por luvisolos e neossolos, comuns nas regiões semiáridas do Nordeste brasileiro. O relevo da região está sobre o Sudoeste do Planalto da Borborema, apresentando níveis mais altos superiores a 600 metros, variando de um relevo ondulado a montanhoso, mas também apresentando áreas caracterizadas com relevo suavemente ondulado (GOMES et al., 2017).

Nesta região os principais reservatórios públicos são o Epitácio Pessoa, Sumé, Cordeiro, Poções e Camalaú (PARAÍBA, 2001). Esses reservatórios se configuram como fontes importantes de recursos hídricos para a região e suas águas são objeto de diversos conflitos pelos usos múltiplos.

Os reservatórios do Alto Curso do rio Paraíba estudados nessa pesquisa são Poções, Camalaú e Epitácio Pessoa, que se encontram dentro do Eixo Leste do PISF. A região do Alto

Curso foi escolhida por conter um dos principais reservatórios da região, o Epitácio Pessoa, por fazer parte do Eixo Leste do Projeto de Integração, por ser contemplada dentro do monitoramento da qualidade da água do referido projeto e por este eixo encontra-se concluído e em operação. O Quadro 3 traz dados operativos e estruturais dos reservatórios estudados.

Quadro 3 - Características gerais do reservatórios estudados

Características	Unidade	Poções	Reservatórios	
			Camalaú	Epitácio Pessoa
Operador	-	DNOCS	CAGEPA	DNOCS
Município	-	Monteiro	Camalaú	Cabaceiras, Barra de São Miguel e Boqueirão
Volume total afluente anual	m ³	28,98	48,17	337,25
Área de drenagem	km ²	670,0	1.061,4	12.394,5
Volume (capacidade)	m ³	29.861.562	48.107.240	466.525.964
Extensão da barragem principal	m	206,00	320,00	347,00
Tomada de água – abastecimento demandas	-	Bombas sobre flutuantes	Bombas sobre flutuantes	Tubulação de 1,5m de diâmetro; comporta stop-log; duas derivações controladas por registros gaveta de 0,75m de diâmetro
Tipo do vertedor principal	-	Canal escavado em solo natural com perfil Creager	Terreno natural	Livre com perfil em soleira espessa
Principais usos	-	Abastecimento público, aquicultura, industrial.	Abastecimento público, aquicultura	Abastecimento público, agricultura irrigada, aquicultura, pesca artesanal.

Fonte: ANA (2017a); AESA (2022).

Reservatório Poções

O reservatório Poções foi construído com a finalidade de irrigação e abastecimento de água da cidade de Monteiro, única sede municipal atendida (ARAGÃO, 2008; BRITO et al., 2012), que de acordo com o último censo do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2010) possui uma população de 30.852 habitantes (Figura 9). A partir de 2020 foram concedidas autorizações para uso da água no desenvolvimento de atividades industriais e aquicultura (AESA, 2022).

Figura 9 - Registro fotográfico do reservatório Poções no município de Monteiro - PB, em 2018



(Cardoso, maio 2018)

Reservatório Camalaú

O reservatório Camalaú (Figura 10), localizado no município de Camalaú, foi construído com a finalidade de abastecimento público, anteriormente foram desenvolvidas também as atividades de aquicultura extensiva e irrigação em suas águas (ARAGÃO, 2008), mas foram interrompidas nos períodos de seca extrema. Atualmente, em 2022, foi retomada liberação de outorga para uso da água na aquicultura (AESA, 2022). As sedes municipais abastecidas são Camalaú e São João do Tigre (ANA, 2017a), com população estimada de 5.749 habitantes e 4.396 habitantes, respectivamente (IBGE, 2010).

Figura 10 - Registro fotográfico do reservatório Camalaú no município de Camalaú - PB, em 2018



(Nogueira da Silva, fevereiro de 2022)

Reservatório Epitácio Pessoa

O reservatório Epitácio Pessoa, também conhecido como Boqueirão, é o principal reservatório da bacia do rio Paraíba (Figura 11). Sua bacia hidráulica ocupa um território de 12.410 km², com capacidade de armazenamento de 466.525.964 m³ de água, recentemente reavaliada através da atualização das curvas Cota x Área x Volume divulgadas pela AESA, alterando o volume anterior para 411.686.287 m³ (PARAÍBA, 2019).

Figura 11 - Registro fotográfico do reservatório Epitácio Pessoa no município de Boqueirão - PB, em 2018



(Cardoso, maio 2018)

O reservatório foi construído pelo Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS) nos anos de 1951 a 1956, com a finalidade de perenizar o rio Paraíba e gerar energia elétrica, uso jamais efetivado, e em 1958 um ano após a inauguração passou a abastecer a cidade de Campina Grande, por causa de uma crise hídrica (AESA, 2007). A população dos municípios no seu entorno, Boqueirão, Cabaceiras e Barra de São Miguel, somam um total estimado pelo IBGE, no último censo, de 27.534 habitantes (IBGE, 2010).

Ao longo dos anos passou a ter sua água associada a outros usos além do abastecimento público, como irrigação, pesca artesanal, dessedentação animal, lazer, esportes e aquicultura, onde este último ocorreu em pequena escala, foi interrompido nos últimos períodos de estiagem severa e em 2020 retornou com liberação de novas outorgas (AESA, 2022).

O reservatório Epitácio Pessoa, assim como os outros reservatórios da região, passou nos últimos anos por períodos de escassez hídrica com severas consequências no abastecimento das cidades dependentes do seu sistema. Este reservatório compõe o Sistema Hídrico Epitácio

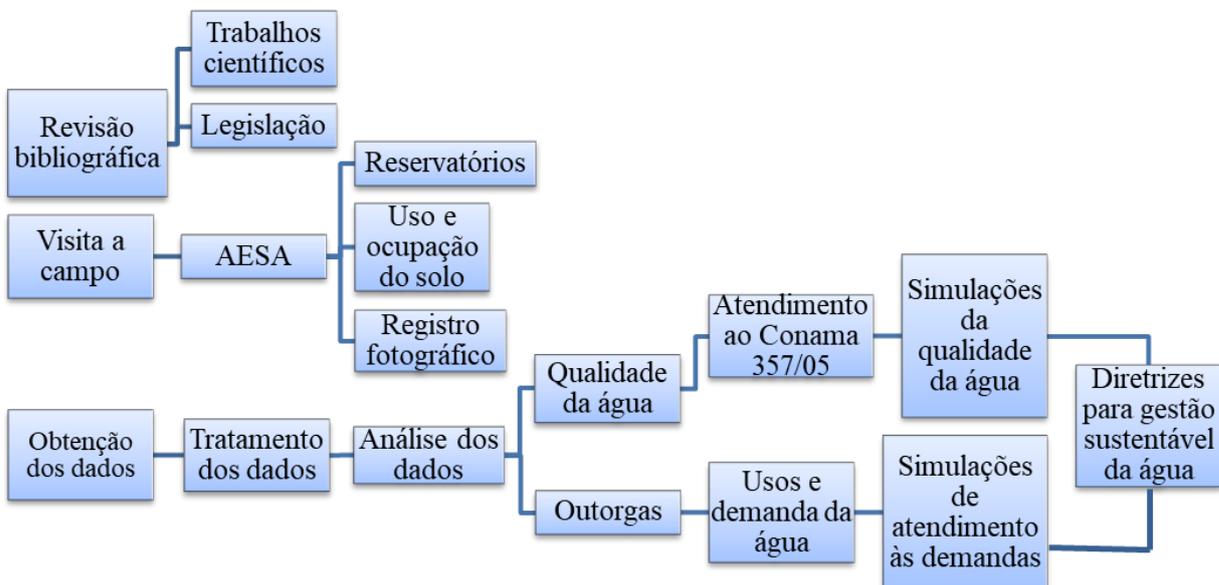
Pessoa responsável pelo abastecimento de subsistemas através das adutoras SIAA – Campina Grande e SIAA – Cariri, pela CAGEPA.

As sedes municipais paraibanas atendidas pelo Sistema Hídrico Epitácio Pessoa são Alagoa Nova, Alcantil, Areial, Barra de Santana, Barra de São Miguel, Boa Vista, Boqueirão, Cabaceiras, Campina Grande, Caturité, Cubati, Juazeirinho, Lagoa Seca, Matinhas, Montadas, Olivedos, Pedra Lavrada, Pocinhos, Puxinanã, Queimadas, São Sebastião de Lagoa de Roça, São Vicente do Seridó, Soledade e Sossêgo (ANA, 2017a). Estes municípios somam um total de 642.260 habitantes (IBGE, 2010).

3.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A primeira fase dessa etapa foi composta pela revisão bibliográfica e visita à campo. A segunda fase se deu a partir da obtenção e análise de dados, seguida da discussão dos resultados e dos principais desafios para sustentabilidade hídrica na área de estudo (Figura 12).

Figura 12 – Fluxograma metodológico das etapas realizadas neste capítulo



Fonte: A autora (2021)

3.2.1 Levantamento de dados secundários

Foi realizado o levantamento de documentos, arcabouço legal e artigos publicados, bem como as outorgas e licenças ambientais junto aos órgãos gestores envolvidos (ANA, AESA,

APAC, IBAMA, e secretarias municipais). Foram consultados relatórios técnicos e documentos publicados acerca de dados sobre cota, vazão, armazenamento, autorizações aplicadas aos reservatórios da Bacia Hidrográfica do rio Paraíba.

Os dados físico-químicos e biológicos para análise da qualidade da água foram obtidos a partir de campanhas de monitoramento realizadas pelo PISF para o Programa de Monitoramento da Qualidade da Água e Limnologia (PBA 22). O PBA 22 é realizado por meio de parceria entre o Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR) e o Grupo de Gestão Ambiental (GGA) do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), solicitado como condicionante no processo de obtenção da Licença Prévia – LP 200/2005, expedida pelo IBAMA.

3.2.2 Levantamento das outorgas para captação de água

A avaliação dos volumes e vazões requeridos para a região do Alto Curso do rio Paraíba foi desenvolvida por meio dos dados de outorgas de uso dos recursos hídricos concedidas pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), disponibilizadas no endereço eletrônico <https://www.ana.gov.br/regulacao/principais-servicos/outorgas-emitidas>.

Em relação ao critério de seleção das outorgas, optou-se por selecionar todas aquelas com prazo de vigência em andamento nos reservatórios de estudo. As outorgas analisadas foram disponibilizadas até dezembro/2019. Para os dados brutos emitidos pela ANA foi realizada análise de consistência. Para avaliação da eficiência dos métodos de irrigação foi utilizado como referência a Resolução N° 707/2004 da ANA. Não foram identificadas outorgas emitidas pela ANA para o reservatório Camalaú durante o período de análise.

Foi realizado levantamento da legislação pertinente ao gerenciamento dos usos múltiplos nos reservatórios no Alto Curso do rio Paraíba, sobretudo, aquelas emitidas de acordo com a oferta de água após início de operação do PISF.

3.2.3 Análise da qualidade da água

Os dados físico-químicos e biológicos para análise da qualidade da água foram obtidos a partir de 7 estações de amostragem monitoradas pelo PBA 22 (Tabela 2 e Figura 13), em 16 campanhas realizadas semestralmente no período de 2011 a 2019, já para os dados usados na calibração do modelo no AcquaNet, foram utilizadas 20 campanhas semestrais no período de 2009 a 2019 (Tabela 3).

Tabela 2 - Estações de amostragem e sua localização referente ao Programa de monitoramento da Qualidade da Água e Limnologia (PBA 22)

Ponto	Local	Trecho	Latitude	Longitude
Q68	Reservatório Poções	Lêntico	-07 53' 21,19958"	-36 59' 50,58801"
Q69	Jusante do reservatório Poções	Lótico	-07 52' 15,39056"	-36 53' 11,94487"
Q70	Reservatório Camalaú	Lêntico	-07 53' 13,76235"	-36 49' 59,12300"
Q71	Jusante do reservatório Camalaú	Lótico	-07 43' 03,43465"	-36 29' 59,25429"
Q72	Montante do reservatório Epitácio Pessoa	Lótico	-07 31' 04,65834"	-36 18' 33,12235"
Q73	Reservatório Epitácio Pessoa	Lêntico	-07 29' 13,92651"	-36 08' 24,21558"
Q74	Jusante do reservatório Epitácio Pessoa	Lótico	-07 30' 18,79123"	-36 03' 56,27791"

Fonte: BRASIL (2016).

Tabela 3 – Campanhas do Programa de Monitoramento da Qualidade da Água e Limnologia (PBA 22) do PISF

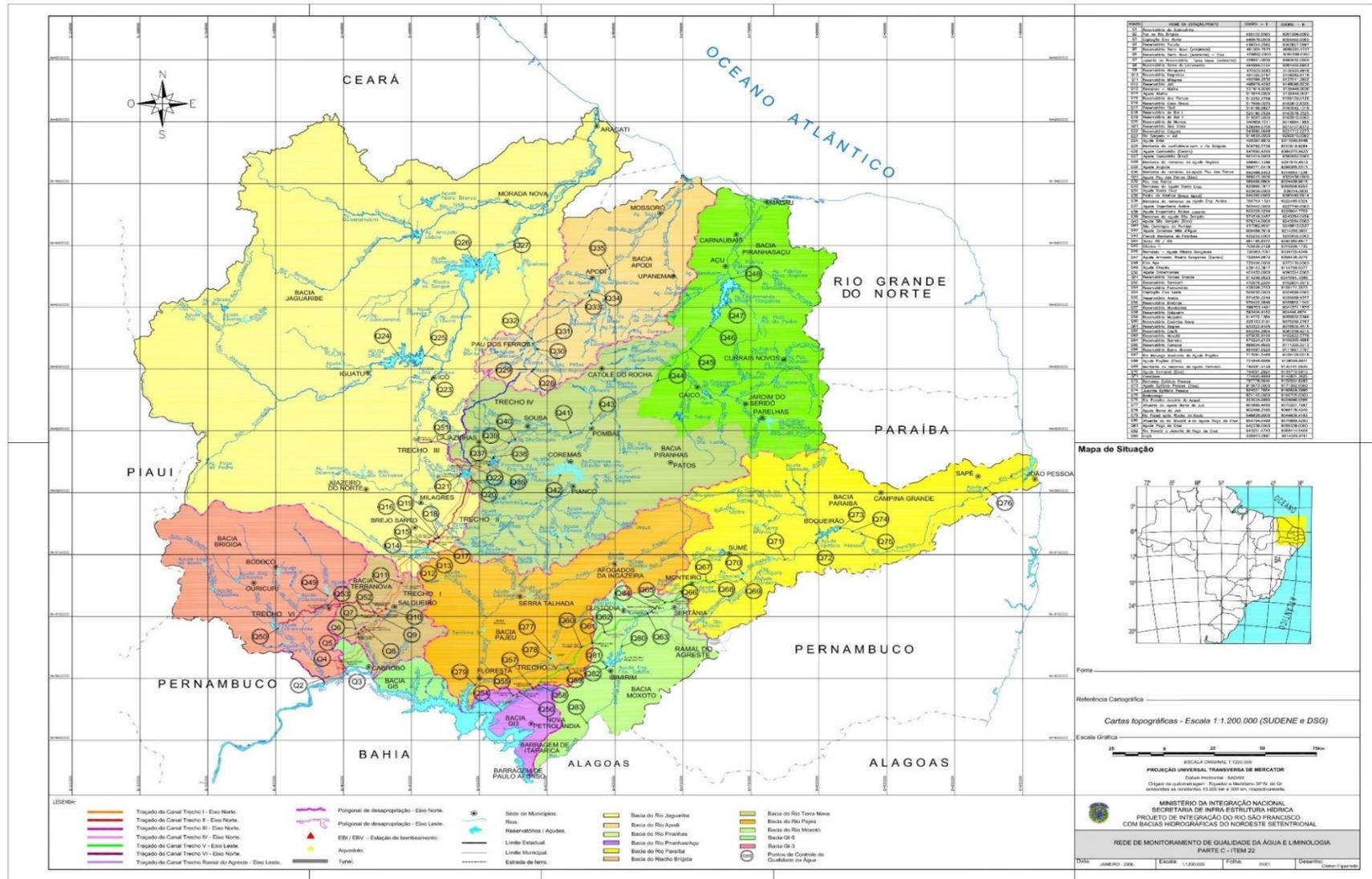
Campanha	Período	Ano	Clima
1	março a abril	2009	chuvoso
2	julho a agosto	2009	seco
3	fevereiro a março	2010	chuvoso
4	outubro a novembro	2010	seco
5	fevereiro a março	2011	chuvoso
6	agosto a setembro	2011	seco
7	abril a maio	2012	chuvoso
8	novembro	2012	seco
9	janeiro a março	2013	chuvoso
10	setembro a outubro	2013	seco
11	fevereiro a abril	2014	chuvoso
12	agosto a outubro	2014	seco
13	fevereiro a maio	2015	chuvoso
14	agosto a outubro	2015	seco
15	abril a junho	2016	chuvoso
16	setembro a novembro	2016	seco
17	março a junho	2017	chuvoso
18	agosto a dezembro	2017	seco
19	agosto a novembro	2018	seco
20	março a junho	2019	chuvoso

Fonte: A autora (2020).

Apesar das definições climatológicas, dos períodos seco e chuvoso, nos anos de 2012 a 2016, devido às condições climáticas locais, estes foram anos de estiagem (SOBRAL et al., 2018). De acordo com Moura et al. (2007), a variabilidade climática no semiárido se apresentam de forma sazonal, com precipitações pluviométricas num curto período (média de três meses), de forma irregular, podendo ocorrer eventos extremos de escassez.

Estudo analisando o comportamento da precipitação no Submédio da bacia hidrográfica do rio São Francisco, no semiárido nordestino, observou uma modificação importante no padrão da precipitação, com predominância de mais períodos com anos secos do que úmidos, a partir da década de 1990, tanto em quantidade de ocorrência quanto em relação à intensidade desses eventos, gerando incertezas associadas a uma potencial mudança climática (SOBRAL et al., 2018).

Figura 13 – Localização dos pontos de amostragem do monitoramento da qualidade da água do PISF



Fonte: MI (2006)

A avaliação da qualidade da água foi estruturada através da análise dos parâmetros físico-químicos e biológicos da água e os cálculos dos Índices de Qualidade da Águas (IQA), adaptado pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) da *National Sanitation Foundation* e de Estado Trófico (IET), segundo Índice de Carlson modificado conforme a CETESB (2017).

Os parâmetros de qualidade da água analisados foram: temperatura (°C), oxigênio dissolvido (OD), pH, turbidez, demanda bioquímica de oxigênio (DBO), nitrogênio amoniacal total (N total), nitrato (NO₃), nitrito (NO₂), fósforo total (P total), sólidos dissolvidos totais (SDT), coliformes termotolerantes e clorofila-*a*.

Os resultados obtidos foram relacionados aos padrões indicados na Resolução CONAMA N° 357, de 17 de março de 2005, para águas de classe 2 (BRASIL, 2005), de acordo com enquadramento para área de estudo, estabelecido pela Superintendência de Administração do Meio Ambiente do Estado da Paraíba (SUDEMA, 1988) baseado na Resolução CONAMA 20/1986 que trata deste tema (BRASIL, 1986).

As análises dos parâmetros físico-químicos e biológico seguiram metodologias descritas em bibliografia técnica (Tabela 4), por laboratórios certificados (Sabinbiotec-Biotecnologia S/A, AgroSafety-Monitoramento Agrícola e SENAC de Petrolina - PE) que forneceram os resultados dos parâmetros aferidos. As amostras foram coletadas na superfície da coluna de água.

Tabela 4 - Técnicas de análise para os parâmetros físico-químicos

Parâmetros	Unidade	Método
Campo		
Temperatura	°C	
Oxigênio Dissolvido	mg L ⁻¹ O ₂	Sonda multiparamétrica (Horiba, modelo B-213)
pH	-	
Turbidez	UNT	
Laboratório		
Clorofila-a	µg L ⁻¹	Espectrofotométrico (GOLTERMAN et al., 1978)
Coliformes Termotolerantes	NMP/100 mL	Norma Técnica CETESB L5.221 (CETESB, 1984)
Demanda Bioquímica de Oxigênio - DBO	mg L ⁻¹ O ₂	Colorimétrico (APHA, 1995)
Fósforo Total	mg L ⁻¹ P	Colorimétrico (APHA, 1995)
Nitrato	mg L ⁻¹ NO ₃	Colorimétrico (RODIER, 1975)
Nitrito	mg L ⁻¹ NO ₂	Colorimétrico (MACKERETH et al., 1978)
Nitrogênio amoniacal	mg L ⁻¹ N	<i>Standard Methods</i> (APHA, 1995)
Sólidos Dissolvidos Totais	mg L ⁻¹	Gravimetria (APHA, 1995).

Fonte: BRASIL (2002).

Para validação dos dados foram aplicados testes estatísticos. Neste sentido, a hipótese de normalidade dos dados foi verificada pelo teste de Shapiro-Wilk. Para comparar se houveram diferenças significativas entre o período estudado foi aplicado o teste H de Kruskal Wallis, com nível de 5% de significância.

Índice de Qualidade da Água (IQA)

O IQA é calculado pelo produtório ponderado das qualidades de água correspondentes às variáveis que integram o índice. Para tal a Equação 1 é utilizada:

$$IQA = \prod_{i=1}^n q_i^{w_i} \quad (1)$$

onde:

IQA: Índice de Qualidade das Águas, um número entre 0 e 100;

qi: qualidade do i-ésimo parâmetro, um número entre 0 e 100, obtido da respectiva “curva média de variação de qualidade”, em função de sua concentração ou medida,

wi: peso correspondente ao i-ésimo parâmetro, um número entre 0 e 1, atribuído em função da sua importância para a conformação global de qualidade; e n: número de variáveis que entram no cálculo do IQA.

O IQA foi calculado com base em nove parâmetros, estes foram: temperatura da água, OD, coliformes termotolerantes, pH, DBO, nitrogênio total (NT), fósforo total (PT), turbidez e SDT.

No caso de não se dispor do valor de alguma das nove variáveis, o cálculo do IQA é inviabilizado, devido a isso os pontos amostrais Q69 (período chuvoso de 2015) e Q73 (período chuvoso de 2013), não apresentaram resultados. Além destes dois pontos, outros também não possuem resultados do IQA pois registraram ausência de água no período da coleta. O mesmo padrão aplica-se para o IET.

A partir do cálculo efetuado, pode-se determinar a qualidade das águas brutas, que é indicada pelo IQA, variando numa escala de 0 a 100, representado no Tabela 5.

Tabela 5 - Classificação do Índice de Qualidade da Água (IQA)

Categoria	Ponderação
Ótima	$79 < IQA \leq 100$
Boa	$51 < IQA \leq 79$
Regular	$36 < IQA \leq 51$
Ruim	$19 < IQA < 36$
Péssima	$IQA \leq 19$

Fonte: CETESB (2017).

Índice do Estado Trófico (IET)

Para o cálculo do Índice do Estado Trófico - IET, foi utilizada a equação proposta por Carlson (1977), modificada Lamparelli (2004), que alterou as expressões originais, através de análises estatísticas por regressão, para adequá-las aos ambientes tropicais, como mostra as Equações (2) e (3).

Rios (ambientes lóticos)

$$\begin{aligned}
 IET(CL) &= 10 \cdot \left[6 - \frac{(-0,7 - 0,6 \cdot \ln CL)}{\ln 2} \right] - 20 \\
 IET(PT) &= 10 \cdot \left[6 - \frac{(0,42 - 0,36 \cdot \ln PT)}{\ln 2} \right] - 20
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Reservatórios (ambientes lênticos)

$$\begin{aligned}
 IET(CL) &= 10 \cdot \left[6 - \frac{(0,92 - 0,34 \cdot \ln CL)}{\ln 2} \right] \\
 IET(PT) &= 10 \cdot \left[6 - \frac{(1,77 - 0,42 \cdot \ln PT)}{\ln 2} \right]
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

onde:

PT: concentração de fósforo total medida à superfície da água, em $\mu\text{g.L}^{-1}$;

CL: concentração de clorofila-a medida à superfície da água, em $\mu\text{g.L}^{-1}$;

ln: logaritmo natural.

O resultado dos valores mensais apresentados nos quadros do IET é a média aritmética simples, com arredondamento da primeira casa decimal, dos índices relativos ao PT e a CL, segundo a Equação (4):

$$IET = \frac{IET(PT) + IET(CL)}{2}
 \tag{4}$$

Os limites estabelecidos para as diferentes classes de trofia, para rios e reservatórios, estão descritos nas Tabelas 6 e 7 a seguir.

Tabela 6 - Classificação do Estado Trófico para rios segundo Índice de Carlson modificado conforme a CETESB (2017)

Classificação do Estado Trófico – RIOS				
Categoria (Estado Trófico)	Ponderação	Secchi - S (m)	P-Total – P (mg.m ⁻³)	Clorofila-a (mg.m ⁻³)
Ultraoligotrófico	IET ≤ 47	-	P ≤ 13	CL ≤ 0,74
Oligotrófico	47 < IET ≤ 52	-	13 < P ≤ 35	0,74 < CL ≤ 1,31
Mesotrófico	52 < IET ≤ 59	-	35 < P ≤ 137	1,31 < CL ≤ 2,96
Eutrófico	59 < IET ≤ 63	-	137 < P ≤ 296	2,96 < CL ≤ 4,70
Supereutrófico	63 < IET ≤ 67	-	296 < P ≤ 640	4,70 < CL ≤ 7,46
Hipereutrófico	IET > 67	-	640 < P	7,46 < CL

Fonte: CETESB (2017).

Tabela 7 - Classificação do Estado Trófico para reservatórios segundo Índice de Carlson modificado conforme a CETESB (2017)

Classificação do Estado Trófico – RESERVATÓRIOS				
Categoria (Estado Trófico)	Ponderação	Secchi -S (m)	P-Total – P (mg.m ⁻³)	Clorofila-a (mg.m ⁻³)
Ultraoligotrófico	IET ≤ 47	S ≥ 2,4	P ≤ 13	CL ≤ 0,74
Oligotrófico	47 , IET ≤ 52	2,4 > S ≥ 1,7	13 < P ≤ 35	0,74 < CL ≤ 1,31
Mesotrófico	52 < IET ≤ 59	1,7 ≥ S ≥ 1,1	35 < P ≤ 137	1,31 < CL ≤ 2,96
Eutrófico	59 < IET ≤ 63	1,1 ≥ S ≥ 0,8	137 < P ≤ 296	2,96 < CL ≤ 4,70
Supereutrófico	63 < IET ≤ 67	0,8 > S ≥ 0,6	296 < P ≤ 640	4,70 < CL ≤ 7,46
Hipereutrófico	IET > 67	0,6 > S	640 < P	7,46 < CL

Fonte: CETESB (2017).

De acordo com Zagatto et al. (1999), os resultados de transparência nem sempre conseguem refletir com fidelidade o estado de trofia, porque a turbidez da água pode ser afetada, tanto pelo material em suspensão, como pela densidade de organismos planctônicos. Deste modo, como não foi realizada análise dos sólidos suspensos, a transparência da água foi retirada do cálculo do IET. Os valores do IET são classificados segundo classes de estado tróficos (Tabela 8).

Tabela 8– Descrição das categorias do Índice de Estado Trófico

Valor do IET	Classes de Estado Trófico	Características
47	Ultraoligotrófico	Corpos d'água limpos, de produtividade muito baixa e concentrações insignificantes de nutrientes que não acarretam prejuízos aos usos da água.
47 < IET = 52	Oligotrófico	Corpos d'água limpos, de baixa produtividade, em que não ocorrem interferências indesejáveis sobre os usos da água, decorrentes da presença de nutrientes.

52 <IET= 59	Mesotrófico	Corpos d'água com produtividade intermediária, com possíveis implicações sobre a qualidade da água, mas em níveis aceitáveis, na maioria dos casos.
59<IET=63	Eutrófico	Corpos d'água com alta produtividade em relação às condições naturais, com redução da transparência, em geral afetados por atividades antrópicas, nos quais ocorrem alterações indesejáveis na qualidade da água decorrentes do aumento da concentração de nutrientes e interferências nos seus múltiplos usos.
63<IET=67	Supereutrófico	Corpos d'água com alta produtividade em relação às condições naturais, de baixa transparência, em geral afetados por atividades antrópicas, nos quais ocorrem com frequência alterações indesejáveis na qualidade da água, como a ocorrência de episódios florações de algas, e interferências nos seus múltiplos usos
> 67	Hipereutrófico	Corpos d'água afetados significativamente pelas elevadas concentrações de matéria orgânica e nutrientes, com comprometimento acentuado nos seus usos, associado a episódios florações de algas ou mortandades de peixes, com consequências indesejáveis para seus múltiplos usos, inclusive sobre as atividades pecuárias nas regiões ribeirinhas.

Fonte: Adaptado de CETESB (2007) e LAMPARELLI (2004).

Avaliação da comunidade fitoplanctônica

Para o exame da comunidade fitoplanctônica, as amostras foram coletadas na superfície da lâmina d'água (até 30 cm), com garrafas de polipropileno com capacidade de 1 L e preservadas com lugol acético e analisadas no Núcleo de Pesquisa em Ecossistemas Aquáticos (NUPEA), na Universidade Estadual da Bahia (UNEB).

A identificação dos organismos foi realizada, sempre que possível, até o nível de espécie, a partir de amostras examinadas em microscópio binocular, com até 1.000 vezes de aumento, considerando características morfológicas e morfométricas das fases vegetativas e reprodutivas, com base em bibliografia especializada. As principais chaves taxonômicas utilizadas foram Medlin; Kaczmarska (2004) para enquadramento taxonômico das Bacillariophyta, o de Anagnostidis; Komárek (1988) e Komárek; Anagnostidis (2005) para Cyanobacteria, os Komárek e Foot (1983), Popovský e Pfiester (1990) para as Chlorophyta e o Sistema de Van den Hoek et al. (1995) para os demais grupos taxonômicos, objetivando chegar, sempre que possível, ao menor nível taxonômico.

A análise quantitativa foi realizada em microscópio invertido Zeiss (Axiovert 25), de acordo com o método de sedimentação de Utermöhl (1958). A partir dos resultados de densidade foi calculada a abundância relativa (LOBO; LEIGHTON, 1986).

Análise de Correspondência Canônica

A análise multivariada teve como objetivo correlacionar as variáveis físico-químicas com as biológicas. A Análise de Correspondência Canônica (ACC) analisa as relações lineares existentes entre dois conjuntos de variáveis (MINGOTI, 2005). As informações de cada conjunto de variáveis foram sintetizadas em combinações lineares, considerando a maximização da correlação entre as combinações lineares de cada conjunto de variáveis.

Para realização da ACC foi usado o programa R Studio 4.1.0. Para tal foram utilizados conjuntos de dados físico-químicos (matrizes de dados ambientais), separados em função das características indicadoras dos parâmetros (variáveis de pressão ou de tipologia) e conjunto de dados biológicos, com as espécies identificadas de cada grupo do fitoplâncton e sua quantificação, a fim de identificar qual conjunto de variáveis físico-químicas interferem no conjunto biológico.

3.2.4 Modelagem da qualidade da água do Alto Curso do rio Paraíba

Para realização da modelagem da qualidade da água foram realizadas simulações com diferentes vazões na bacia hidrográfica em estudo, avaliando as retiradas pontuais da bacia, as recargas e os parâmetros que indicam a qualidade de água. A seguir estão descritos os principais dados de entrada necessários para realização da modelagem e os procedimentos realizados no modelo de suporte à decisão AcquaNet.

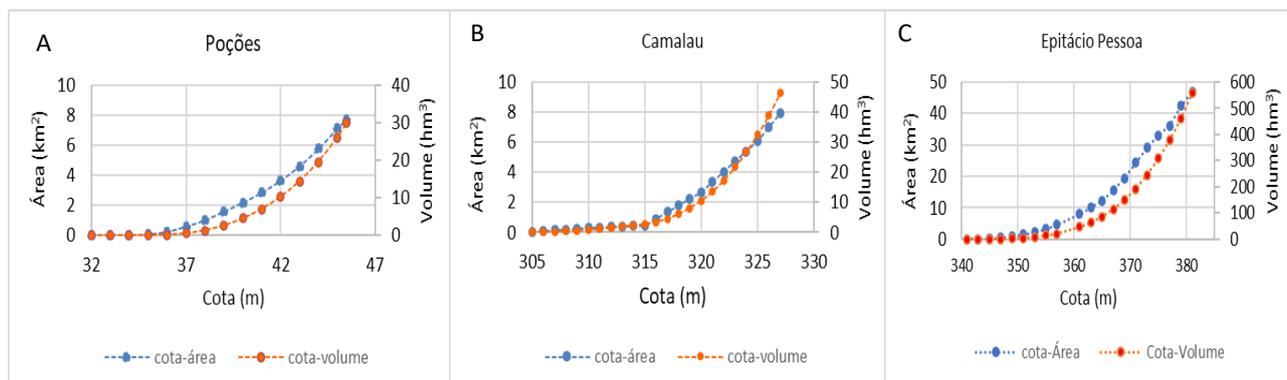
3.2.4.1 Dados de entrada

Dados dos reservatórios

O AcquaNet trabalha de forma integrada com Sistemas de Informações Geográficas (SIG) por meio do carregamento de arquivos *shapefile*. A topologia e atributos da bacia foram obtidos a partir de imagens de satélite e base de dados das ottobacias do SNIRH/ANA, manipulados no QGis, para delimitação e a caracterização da região do Alto Curso do rio Paraíba.

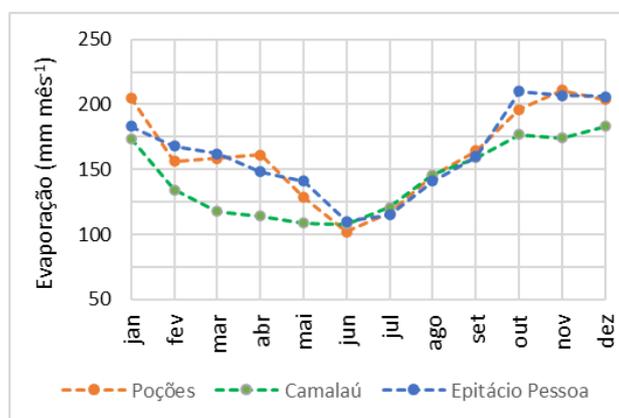
As curvas cota-área-volume dos reservatórios Poções, Camalaú e Epitácio Pessoa são apresentadas nas Figuras 14A, B e C. A evaporação média mensal considerada no balanço hídrico do reservatório Epitácio Pessoa é apresentada na Figura 15.

Figura 14 - Curvas cota-área-volume dos reservatórios: 4 A. - Poções; 4 B. – Camalaú; 4 C. - Epitácio Pessoa



Fonte: A autora (2021).

Figura 15 - Evaporação média mensal nos reservatórios Poções, Camalaú e Epitácio Pessoa



Fonte: A autora (2021).

Demandas de recursos hídricos

As demandas do uso da água nos reservatórios do Alto Curso do rio Paraíba utilizadas na rede modelada no AcquaNet consideraram as demandas outorgadas, concedidas pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), com prazo de vigência em andamento, disponibilizadas até dezembro/2019 e obtidas conforme descrito no subcapítulo 3.2.2.

Para os lançamentos de esgoto e efluentes foram utilizados dados secundários conforme o Atlas de Esgoto: Despoluição de bacias hidrográficas (ANA, 2017f). Os lançamentos das áreas irrigadas tiveram como base Metcalf e Eddy (2003) e Von Sperling (2005; 1997).

Qualidade da água

A obtenção dos dados de oxigênio dissolvido (OD), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), nitrogênio e fósforo total, para calibração da qualidade da água no Alto Curso do rio Paraíba se deu a partir de campanhas de monitoramento do PISF (PBA 22), conforme descrito no subcapítulo 3.2.3.

A calibração do modelo consistiu em testar os coeficientes de decaimento das equações até se obter dados calculados que representassem a mediana dos valores aferidos no monitoramento. Os coeficientes de decaimento foram alterados de modo sistemático no AcquaNet e os resultados em seguida foram comparados com os valores observados. O modelo foi calibrado quando as curvas das concentrações dos parâmetros analisados ficaram entre os intervalos interquartis de 25% (1º quartil) e 75% (3º quartil) dos dados observados (região com 50% dos dados).

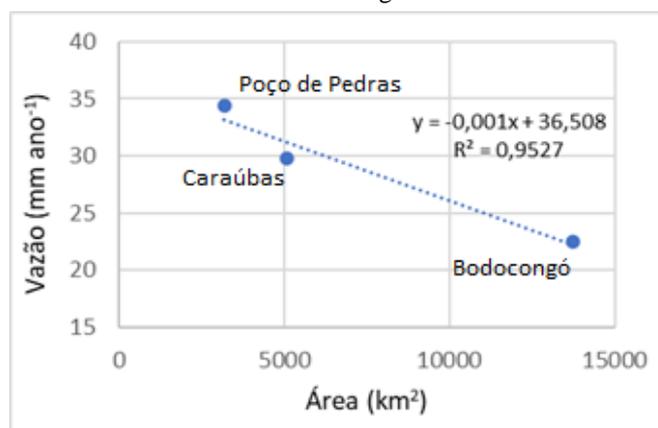
Vazões naturais

As vazões naturais intermediárias adotadas na análise de alocação e na análise da qualidade da água no Alto Curso do rio Paraíba, foram obtidas por meio da correlação das vazões observadas de três postos fluviométricos e da relação de áreas de drenagem intermediárias nos pontos de interesse. O modelo AcquaNet foi utilizado para executar o balanço hídrico na rede de fluxo, buscando representar a operação observada no reservatório Epitácio Pessoa.

Os dados de vazão foram obtidos dos seguintes postos fluviométricos: Caraúbas, Poço de Pedras e Bodocongó, operados pela ANA e disponibilizados através da plataforma Hidroweb (<http://hidroweb.ana.gov.br/>). Adotou-se uma série histórica de 50 anos de dados, de janeiro de 1970 a dezembro de 2019.

O AcquaNet foi utilizado para a alocação e a análise da qualidade da água no sistema. Para isso, é necessário usar as vazões naturais intermediárias afluentes aos reservatórios. Essas vazões foram determinadas por meio de correlação de dados históricos entre os postos, relações de área de drenagem e o balanço hídrico na rede de fluxo. A Figura 16 apresenta as localizações dos postos fluviométricos, reservatórios e a rede de fluxo do sistema.

Figura 17 - Relação entre área de drenagem e vazão específica dos postos Caraúbas, Poço de Pedras e Bodocongó



Fonte: A autora (2021).

As vazões observadas no posto Caraúbas serviram de base para ajustar as vazões mensais afluentes aos reservatórios Poções e Camalaú. As vazões mensais afluentes nestes reservatórios foram calculadas multiplicando a razão da vazão mensal e a vazão específica do posto Caraúbas pela vazão específica de cada posto. As vazões mensais afluentes ao reservatório Epitácio Pessoa e no posto Bodocongó foram calculadas multiplicando a razão da soma das vazões mensais e a soma das vazões específicas dos postos Caraúbas e Poço de Pedras pela vazão específica estimada nos pontos citados.

As médias das vazões mensais calculadas para cada ponto de interesse são apresentadas na Tabela 9. As vazões mensais intermediárias em Camalaú, Caraúbas e Epitácio Pessoa, são calculadas subtraindo as vazões geradas nas respectivas áreas de drenagem de montante. A fim de evitar valores negativos, a vazão mensal no posto Bodocongó é o mínimo entre a subtração das vazões calculadas em Epitácio Pessoa e Bodocongó, e o valor observado no posto fluviométrico.

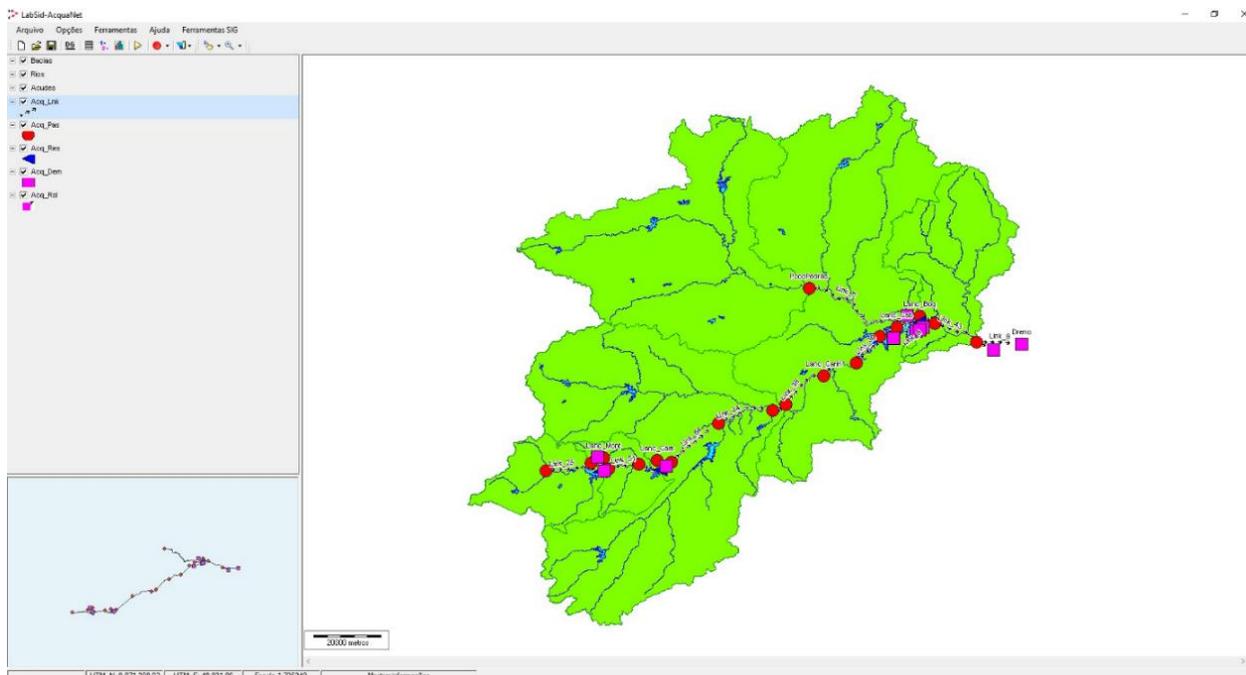
3.2.4.2 Modelo AcquaNet

O AcquaNet executa a otimização sequencial sem previsão e pode ser tratado como um modelo de simulação mediante o qual centenas ou milhares de anos de dados históricos ou sintéticos de vazões podem ser utilizados. Realiza uma análise estatística que permite determinar numa escala de 0 a 100% do tempo, qual será a vazão em todos os links da rede de fluxo (trechos do rio), considerando a série de vazões utilizadas pelo modelo. Neste subcapítulo será apresentado o modelo de funcionamento do AcquaNet, a partir dos módulos de alocação e qualidade da água, de acordo com Porto et al. (2003).

O programa efetua os cálculos de duas maneiras: Simulação Contínua, de maneira sequencial no tempo ou Planejamento Tático, estatisticamente. Neste trabalho, foi utilizado o método de Simulação Contínua, no qual o valor mais importante é o número total de anos de simulação (NT). Neste método, foi fornecido séries de vazões afluentes mensais com duração igual a NT. O modelo efetuou os cálculos continuamente, para todos os anos existentes. Ao final do cálculo, os resultados foram fornecidos mensalmente para todos os anos. O NT foi de 50 anos.

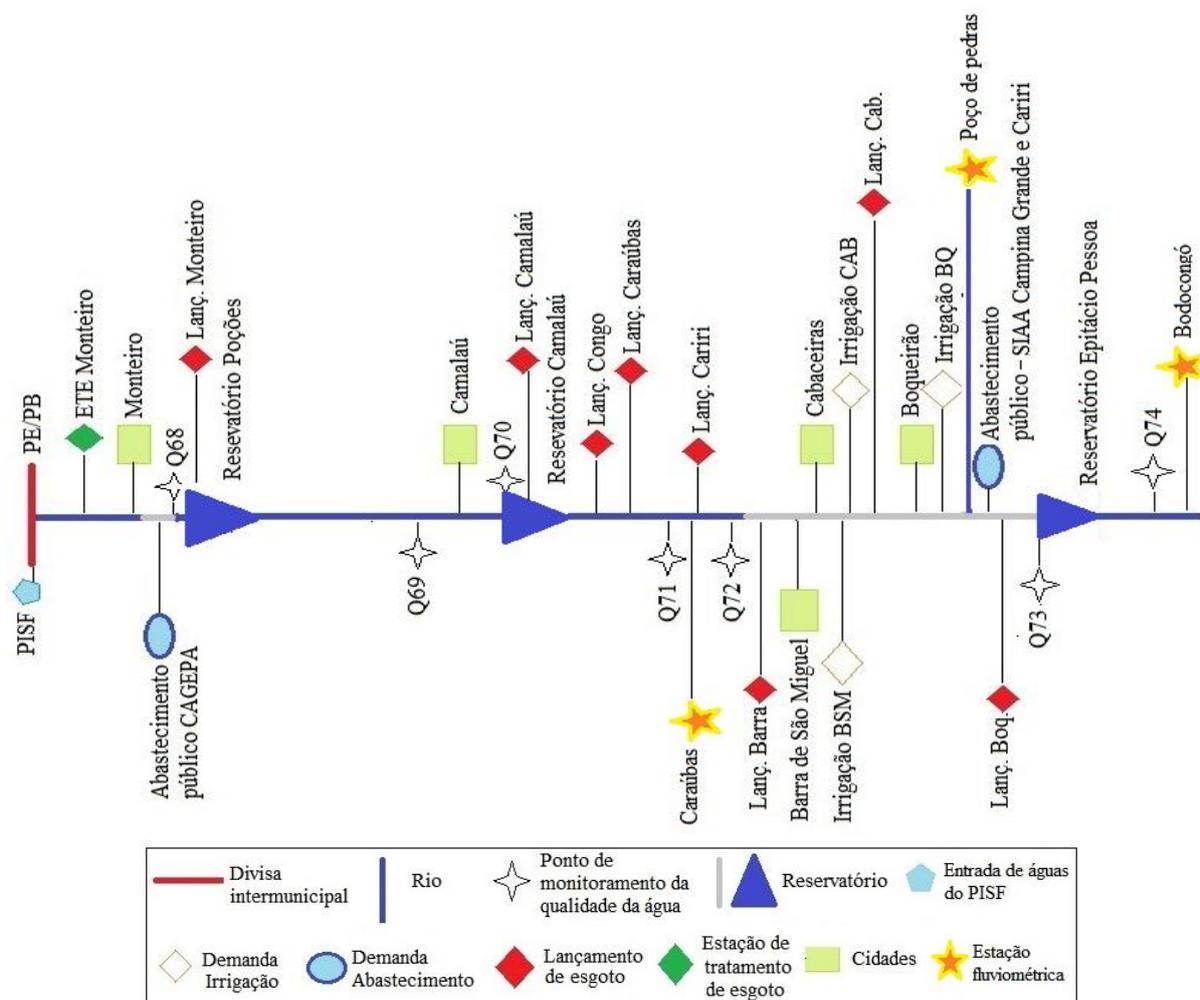
A representação do corpo hídrico no AcquaNet é constituída por um traçado composto por nós e arcos. Os nós podem representar os reservatórios, as demandas da bacia, pontos de confluência entre os rios, pontos de importação de água de uma bacia para outra, ou apenas nós de passagem de água na bacia. Os arcos são os elos de ligação entre os nós e representam trechos de rios, canais naturais ou artificiais. A rede AcquaNet do Alto Curso do rio Paraíba é composta por 3 reservatórios, 7 demandas, 9 nós de passagem, 9 lançamentos e 29 *links* (Figura 18). A seguir é apresentado o diagrama unifilar para visualização da área de estudo, as demandas de uso da água analisadas, a localização dos reservatórios e dos pontos do monitoramento da qualidade da água do PISF (Figura 19).

Figura 18 - Rede AcquaNet do Alto Curso do rio Paraíba



Fonte: A autora (2021).

Figura 19 – Diagrama unifilar da área de estudo



Fonte: A autora (2022).

Para formulação do traçado da rede no AcquaNet foram inseridos os nós de demanda levando em conta as demandas consuntivas de abastecimento público e irrigação, além das vazões ambientais a jusante dos reservatórios. O modelo atende às demandas de acordo com um valor de prioridade (P) atribuída pelo usuário, que pode variar de 1 a 99 (o valor 1 é a maior prioridade). As prioridades P estão relacionadas aos custos C, de forma biunívoca ($C = 10P - 1000$), o que significa que os valores de C que representam prioridades são sempre negativos. Portanto, ao atender uma prioridade, o módulo de alocação diminui os custos da rede de um valor C por unidade de vazão fornecida.

Neste trabalho para as demandas ecológicas foi atribuída Prioridade 1. Para as demandas de abastecimento público foi atribuída a Prioridade 5, para irrigação a Prioridade foi 15. Essas Prioridades foram definidas de acordo com o uso sustentável da água voltado ao uso prioritário.

Sendo as demandas ecológicas necessárias para manutenção mínima dos organismos aquáticos. Quanto às demandas, o abastecimento público como uso primordial, seguido pela irrigação.

Para o Volume-Meta do reservatório Epitácio Pessoa foi atribuída Prioridade 10, visando atender a demanda de abastecimento público em períodos de escassez. Os Volumes-Meta dos reservatórios Poções e Camalaú receberam Prioridade 30, para que fosse garantida a transferência de água até o reservatório Epitácio Pessoa. As demandas relativas ao Volume Vertido, 85, como última prioridade para que os reservatórios atendam primordialmente às demandas antes de liberar água a jusante. Ao Dreno (elemento de ajuste do modelo), foi atribuída Prioridade 99. Quando todas as demandas não puderem ser atendidas, as primeiras a sofrerem déficits serão aquelas com menor valor de prioridade (PORTO et al., 2003).

A operação dos reservatórios é feita utilizando-se o conceito de volume meta ou nível no qual se atribui uma prioridade. Desta forma sempre que o volume armazenado for menor que o volume meta, o reservatório guardará água desde que as outras prioridades da rede sejam menores. O volume armazenado acima do nível meta tem custo zero, ou seja, é livre para atender a quaisquer demandas por menores que sejam suas prioridades. As perdas por evaporação dos reservatórios são levadas em conta por meio de processo iterativo (PORTO et al., 2003).

A rede de fluxo do modelo foi configurada de forma a representar os critérios de operação dos reservatórios Poções, Camalaú e Epitácio Pessoa, considerando o processo vigente de Outorga de Uso dos Recursos Hídricos e do PISF. Tais critérios foram obtidos por meio das avaliações dos dados emitidos pela ANA e AESA, através do REGLA e de marcos regulatórios.

A alocação de água do sistema do AcquaNet se dá a partir da seguinte maneira: o modelo resolve o problema de otimização da rede de fluxo definido pelas Equações. 5 a 8, composta por um conjunto de arcos e nós que representa o sistema hídrico. A variável de decisão é a vazão que transita nos arcos para atendimento das demandas. O balanço hídrico nos reservatórios é dado pela Equação. 8. O intervalo de tempo adotado na análise foi mensal. Nos reservatórios o modelo adota um padrão de mistura completa (PORTO et al., 2003).

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_{ij} \cdot Q_{ij} \quad (5)$$

$$\sum_{i=I_j}^n Q_{ij} - \sum_{i=O_j}^n Q_{jk} = 0 \quad (6)$$

$$I_{ij} \leq Q_{ij} \leq U_{ij} \quad \forall i, j = 1, \dots, n \quad (7)$$

$$V_t = V_{t-1} + I_t - E_t - w_t - Q_t \quad (8)$$

Em que

Q_{ij} - vazão que passa no arco (i, j) definido pelo nó inicial i e o nó terminal j durante o intervalo de tempo t desejado;

Q_{jk} - vazão que passa no arco (j, k) definido pelo nó inicial j e o nó terminal k , durante o intervalo de tempo t desejado;

C_{ij} - custo unitário associado a vazão Q_{ij} , (fator de ponderação que representa os direitos ou prioridades da água operacional, sendo um custo negativo é tratado como um benefício);

I_j - conjunto de todos os nós com arcos que terminam no nó j ($i \in I_j$ significa todos os nós i que são elementos do conjunto I_j);

O_j - conjunto de todos os nós com arcos que se originam no nó j ;

I_{ij} - vazão mínima no arco (i, j) ;

U_{ij} - vazão máxima no arco (i, j) ;

V - volume do reservatório no período t ;

I - vazão natural afluyente ao reservatório no período t ;

Q - vazão que sai do reservatório no período t ;

E - evaporação do reservatório no período t ;

w - é o volume vertido no reservatório no período t .

Os dados de entrada são as vazões naturais afluentes aos reservatórios, a capacidade e as curvas cota-volume dos reservatórios, a capacidade dos arcos, as demandas e as prioridades das demandas e dos volumes meta dos reservatórios. A opção de cálculo adotada na solução da rede de fluxo otimização foi Estados Hidrológicos, onde o modelo considerou a quantidade de água armazenada nos reservatórios para determinar qual o valor de demanda, de volume meta e as prioridades que utilizadas no cálculo de cada um dos meses (PORTO et al., 2003).

O modelo de qualidade da água que está acoplado ao modelo de alocação de água tem a finalidade de avaliar situações resultantes de diferentes estratégias de manejo. Os dados de entrada são as vazões calculadas na alocação, as cargas de poluentes lançadas e as

concentrações pré-existentes no sistema. No processo de modelagem o rio é dividido em trechos que guardam as mesmas características hidráulicas (área da seção, declividade, velocidade, vazão, altura média da lâmina d'água, entre outros), onde são aplicados o balanço de massa e as reações cinéticas e o transporte de carga por advecção (PORTO et al., 2003).

Cada trecho representa um volume de controle onde a simulação da qualidade ocorre em uma série consecutiva de intervalos de tempo discretos em que o fluxo é constante, processo comumente utilizado em modelos de qualidade da água (KUMAR, 2019). O modelo adota a solução unidimensional, para estado permanente, em que não existe variação da concentração em relação ao tempo, sem dispersão do constituinte da qualidade.

As reações cinéticas que afetam o aumento ou diminuição da concentração são de primeira ordem, em que a taxa das reações são proporcionais à concentração. Os constituintes no modulo de qualidade da água são: DBO, OD, nitrogênio orgânico, amônia, nitrito, nitrato, fósforo total, algas e coliformes totais. As reações cinéticas desses constituintes da água, podem ser representadas matematicamente pelas expressões 9 a 17. Cada uma dessas Equações é resultado de um complexo processo químico e biológico que o constituinte presente no corpo de água está sujeito (PORTO et al., 2003).

Algas (A):

$$\frac{dA}{dt} = k_g A - k_{ra} A - \frac{\sigma_1}{H} A \quad (9)$$

Nitrogênio Orgânico (N_o):

$$\frac{dN_o}{dt} = a_{na} k_{ra} A - k_{oa} N_o - \sigma_4 N_o \quad (10)$$

Amônia (N_a):

$$\frac{dN_a}{dt} = k_{oa} N_o - k_{ai} N_a + \frac{\sigma_3}{H} F a_{na} k_g A \quad (11)$$

Nitrito (N_i):

$$\frac{dN_i}{dt} = k_{ai} N_a - k_{in} N_i \quad (12)$$

Nitrato (N_n):

$$\frac{dN_n}{dt} = k_{in} N_i - (1 - F) a_{na} k_g A \quad (13)$$

Fósforo total (P):

$$\frac{dP}{dt} = k_p P \quad (14)$$

DBO (L):

$$\frac{dL}{dt} = -k_d L - k_s L \quad (15)$$

OD (o):

$$\frac{do}{dt} = k_a(o_s - o) - k_d L - \frac{SOD}{H} + (Pk_g - Rk_{ra})A - r_{oa}k_{ai}N_a - r_{oi}k_{in}N_i \quad (16)$$

Coliformes Totais (Coli):

$$\frac{dColi}{dt} = -k'_b Coli \quad (17)$$

Em que

k_d – taxa de decomposição da DBO [d^{-1}];

k_a – taxa de reaeração. Diversos autores propõem fórmulas para sua determinação. O módulo de qualidade traz as fórmulas de Churchill et al., O'Connor e Dobbins, Owens *et al.* e Langbien e Durum [d^{-1}];

k_s – taxa de sedimentação da DBO [d^{-1}];

SOD – demanda de oxigênio no sedimento pela DBO [$g\ m^{-2}\ d^{-1}$];

o – concentração do oxigênio dissolvido presente no corpo de água [$mg\ L^{-1}$];

o_s – concentração de saturação do oxigênio dissolvido, obtido em função da temperatura [$mg\ L^{-1}$];

k_g – taxa de crescimento das algas [d^{-1}];

k_{ra} – taxa de perda da biomassa de algas devido o processo de respiração [d^{-1}];

σ_1 – demanda de oxigênio no sedimento pela algas [$g\ m^{-2}\ d^{-1}$];

σ_2 – demanda de oxigênio no sedimento pelo fósforo [$g\ m^{-2}\ d^{-1}$];

σ_3 – demanda de oxigênio no sedimento pela amônia [$g\ m^{-2}\ d^{-1}$];

σ_4 – taxa de sedimentação do nitrogênio orgânico [d^{-1}];

σ_5 – taxa de sedimentação do fósforo orgânico [d^{-1}];

H – profundidade média do rio no trecho considerado, obtida pela equação de Manning [m];

k_p – taxa de decaimento do fósforo [d^{-1}];

k'_b – taxa das perdas totais dos coliformes [d-1];

F – fator de limitação do nutriente (nitrogênio);

a_{na} – razão estequiométrica do nitrogênio com relação as algas (clorofila) [gN mg-Chla-1];

a_{pa} – razão estequiométrica do fósforo em relação as algas (clorofila) [gP mg-Chla-1];

r_{oa} – razão estequiométrica do oxigênio em relação a amônia [gO gN-1];

r_{oi} – razão estequiométrica do oxigênio em relação ao nitrito [gO gN-1];

r_{on} – razão estequiométrica do oxigênio em relação a nitrogênio total [gO gN-1];

r_{oA} – razão estequiométrica do oxigênio em relação as algas definida pela clorofila A [gO mgChla-1];

P – razão de fotossíntese;

R – razão de respiração;

k_{oa} – taxa de transformação de nitrogênio orgânico em amônia;

k_{ai} – taxa de transformação de amônia em nitrito;

k_{in} – taxa de transformação de nitrito em nitrato.

Quanto ao OD (oxigênio dissolvido), pode-se dizer que a sua respectiva equação relaciona a demanda de oxigênio referente a DBO e a NDBO (DBO referente ao nitrogênio oxidável, que é a concentração do nitrogênio orgânico somada a da amônia), além dos efeitos de crescimento e respiração das algas relacionados à fotossíntese em função dos parâmetros de luz e do nutriente limitante. Além disso, o módulo de qualidade corrige internamente todas as taxas (os ks) para a temperatura de 20°C (PORTO et al., 2003).

Os parâmetros k_{oa} , k_{ai} e k_{in} são multiplicados internamente no módulo de qualidade pelo fator de nitrificação (f_{nitr}), obtido através da Equação 18:

Algas (A):

$$f_{nitr} = 1 - e^{-k_{nitr} \cdot OD} \quad (18)$$

Em que

k_{nitr} – coeficiente de primeira ordem referente a inibição da nitrificação (≈ 0.6). É considerado igual a 1 para concentrações de OD maiores que 3 mg L⁻¹.

O balanço de massa em cada trecho é realizado para cada período calculado, obtendo-se a concentração para o início do tempo seguinte. No AcquaNet o comprimento do canal entre dois nós da rede de fluxo é subdividido em trechos de 1 m. O intervalo de tempo mensal representa a condição média diária da concentração do constituinte de qualidade da água.

Para produção dos cenários de análise da alocação de água foram considerados apenas os reservatórios Poções e Epitácio Pessoa por serem os únicos da área de estudo a possuir demandas consultivas legalizadas.

Os cenários de qualidade da água e alocação de água consideraram diferentes vazões de entrada, onde: cenário 1 – foi realizada simulação sem entrada da água do PISF, considerando apenas as vazões naturais da sub-bacia no período de 1970 a 2019; no cenário 2 - foram utilizadas médias mensais das vazões do PISF referente aos anos de 2017 a 2019, disponíveis na Tabela 10, e extrapoladas para os 50 anos usados na modelagem (1970 a 2019); no cenário 3 – foi realizada simulação considerando apenas os meses de entrada de água do PISF, com vazões originais disponibilizadas (Tabela 10), nos anos de 2017 a 2019; e no cenário 4 – foi considerado na simulação a vazão máxima contínua prevista em projeto para o Eixo Leste, de $10 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (CASTRO, 2011).

Tabela 10 – Vazões ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$) mensais recebidas em Monteiro – PB no Eixo Leste do PISF entre 2017 e 2019

Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
2017	0	0	0	0	3,19	4,91	3,18	3,24	3,32	4,17	3,86	3,68
2018	3,6	4,83	2,8	1,05	0,01	0	0	0	0,45	1,36	1,31	2,3
2019	1,96	0,77	0,6	0,16	0	0	0	0	0	0	0,77	1,98

Fonte: A autora (2021).

A definição dos cenários ocorreu de modo a permitir a análise da influência das águas do PISF na alocação e na qualidade da água do Alto Curso do rio Paraíba, num período de 50 anos, e simulações especificamente nos três primeiros anos de operação do PISF (2017 a 2019), considerando as tendências climáticas e as características gerais que vem ocorrendo na sub-bacia.

Desse modo, nos cenários 1 e 2, foi possível realizar uma projeção de qual é o perfil da alocação e da qualidade da água na área de estudo nos próximos 50 anos, sem e com o PISF, respectivamente, e qual o nível de atendimento às demandas nos reservatórios Poções e Epitácio Pessoa e qual tipo de operação otimizada da alocação de água é indicada pelo modelo.

No cenário 3, buscou-se apresentar uma influência mais fidedigna da alocação e qualidade da água na área de estudo com a chegada das águas do PISF, uma vez que o monitoramento da qualidade da água traz somente dados muito pontuais (semestral). No cenário 4, o objetivo foi de observar qual seria a influência na alocação e na qualidade da água, caso o projeto estivesse trabalhado em condições ótimas (vazão projetada), nos três primeiros anos de operação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados e discussão referentes à: análise dos usos e demandas de recursos hídricos, com destaque para os reservatórios Poções e Epitácio Pessoa; avaliação da qualidade da água; simulação de cenários de alocação de água e de qualidade da água na região do Alto Curso do rio Paraíba. A partir dos resultados obtidos foram traçados os desafios a serem enfrentados para garantir o uso sustentável da água.

4.1 ANÁLISE DOS USOS E DEMANDA DE ÁGUA NO ALTO CURSO DO RIO PARAÍBA

Na região hidrográfica do Alto Curso do rio Paraíba, destacam-se os reservatórios Epitácio Pessoa, responsável pelo abastecimento da maior parcela das demandas de retirada identificadas pela ANA (2017a) e os reservatórios Poções e Camalaú, que têm como finalidade primordial, o abastecimento público, juntos integram o Eixo Leste do PISF (ANA, 2017a; DNOCS, 2019).

Os principais usos analisados pela ANA distinguem-se entre abastecimento urbano, abastecimento rural, dessedentação animal, irrigação, indústria e diluição de efluentes e esgoto doméstico (ANA, 2017a). Para a área de estudo, as duas últimas demandas citadas anteriormente, não foram quantificadas pela agência.

A partir de pesquisa de campo e dados bibliográficos foi verificada ocorrência de pesca artesanal nos três reservatórios de estudo (FEITOSA, 2011; LIMA et al., 2016). Entretanto, a atividade vem decrescendo, devido ao período de seca, quando muitos ribeirinhos migraram para outras regiões ou outras atividades econômicas. De acordo com a Colônia de Pescadores Z-8 Anastácio Maia, em 2019, existiam 600 pescadores cadastrados dos municípios de Boqueirão, Barra de São Miguel, Cabaceiras e mais dois distritos de Campina Grande, Galante e Riacho de Santo Antônio.

De acordo com a ANA (2017a), os reservatórios de estudo abastecem diversos municípios, sendo o principal deles o reservatório Epitácio Pessoa, que abrange 25 sedes municipais, seguido pelo Camalaú que atende as cidades de Camalaú e São João do Tigre e o reservatório Poções, que abastece apenas o município onde encontra-se inserido. Apesar da literatura indicar uso da água para abastecimento humano no reservatório Camalaú, não foram encontrados pedidos de outorgas para uso da água no referido corpo de água. Também não foram observadas outorgas para lançamento de esgoto e efluentes nos três reservatórios.

A questão do lançamento de esgoto e efluentes sem tratamento nos corpos hídricos é preocupante, uma vez que, contribui para diminuir substancialmente a disponibilidade de água para o consumo humano, se intensificando no meio rural, que apresenta um déficit maior relacionado ao esgotamento sanitário. Informações escassas a cerca desses lançamentos na água dificultam o planejamento e a gestão dos recursos hídricos. A identificação dos pontos de lançamento não é importante apenas para aplicação de práticas corretivas, como o tratamento, mas para adoção de práticas preventivas, buscando alternativas como reuso.

A situação do esgotamento sanitário nos principais municípios situados ao longo da calha principal do rio Paraíba (Alto Curso) no Eixo Leste do PISF encontra-se insatisfatória, segundo os últimos dados apresentados em 2013 (ANA, 2017f). Sobretudo, quando observados os índices de atendimento ao tratamento de esgoto, onde mostram que apenas Monteiro possui atendimento com coleta e tratamento de esgoto acima de 60% (Tabela 11). Os municípios de Monteiro e Boqueirão apresentaram as mais altas cargas de lançamento de DBO, com indicativo de necessidade alta de remoção de patógenos (ANA, 2017f).

Estudo de Silva et al. (2014), mostrou que na nascente do Rio Paraíba, localizada em Monteiro - PB, é realizado lançamento de parte dos efluentes domésticos do município diretamente no leito do rio. Os autores relatam que apesar da maioria dos domicílios da região estarem ligados à rede geral de esgoto, há contaminação do rio, pois os lançamentos ocorrem em locais inadequados e não existe manutenção apropriada das fossas sépticas e rudimentares.

Barra de São Miguel e Camalaú são uma das situações mais críticas com 93,3% e 64,7%, respectivamente, das residências sem coleta e tratamento de esgoto. Caraúbas apresenta 63,1% de atendimento à demanda de esgotamento sanitário, no entanto, este é realizado através do uso de fossas sépticas. Apenas 28,9% do esgoto faz parte da rede de coleta, mas não é tratado (ANA, 2017f).

Segundo a ANA (2017f), no Plano Nacional de Saneamento Básico (2014), a utilização de fossa séptica é considerada como atendimento adequado de esgotamento sanitário na categoria individual. Capaz de diminuir a carga orgânica dos efluentes e conseqüentemente o impacto dos lançamentos nos corpos hídricos, se executada adequadamente e em condições propícias à sua aplicação, sendo excelente alternativa de saneamento ambiental (VICQ; LEITE, 2014; ANA, 2017f).

Tabela 11 – Esgotamento sanitário das sedes municipais ao longo da calha principal no Alto Curso do rio Paraíba, no Eixo Leste do PISF

Município	População Urbana (2013)	População Urbana (2035)	Índice sem atendimento - sem Coleta e sem Tratamento (2013)	Índice de Atendimento por Solução Individual (2013)	Índice de Atendimento com Coleta e sem Tratamento (2013)	Índice de Atendimento com Coleta e com Tratamento (2013)	Vazão Total em 2013 (m ³ s ⁻¹)	Carga Lançada Total em 2013 (Kg DBO/dia)	Necessidade de Remoção de DBO	Tipologia de Solução
Barra de São Miguel	2.454	3.095	93,3%	2,8%	3,9%	0,0%	0,0035	130,3	Corpo receptor intermitente ou efêmero	Corpo receptor intermitente ou efêmero (Requer alta remoção de patógenos)
Boqueirão	12.394	14.015	30,6%	0,6%	68,8%	0,0%	0,0196	666,9	Corpo receptor intermitente ou efêmero	Corpo receptor intermitente ou efêmero (Requer alta remoção de patógenos)
Cabaceiras	2.342	3.366	41,4%	0,0%	58,6%	0,0%	0,0035	126,5	Acima de 80%	Tratamento secundário avançado
Camalaú	2.971	4.205	64,7%	0,5%	34,8%	0,0%	0,0028	160,0	Corpo receptor intermitente ou efêmero	Corpo receptor intermitente ou efêmero (Requer alta remoção de patógenos)
Caraúbas	1.577	2.761	8,0%	63,1%	28,9%	0,0%	0,0013	52,9	Acima de 80%	Tratamento secundário avançado
Congo	2.994	3.429	35,8%	8,8%	55,4%	0,0%	0,0044	153,1	Corpo receptor intermitente ou efêmero	Corpo receptor intermitente ou efêmero (Requer alta remoção de patógenos)
Monteiro	21.153	30.019	15,1%	3,2%	16,2%	65,5%	0,0182	559,1	Corpo receptor intermitente ou efêmero	Corpo receptor intermitente ou efêmero (Requer alta remoção de patógenos)
São Domingos do Cariri	1.078	1.693	24,3%	0,6%	75,2%	0,0%	0,0013	58,0	Acima de 80%	Tratamento secundário avançado

Fonte: Adaptado de ANA (2017f).

Apesar da falta de dados completos mais recentes sobre a situação do esgotamento sanitário nos municípios, na área de abrangência da região de estudo, pode-se observar que o lançamento de esgoto ocorre, seu tratamento é deficitário e seu volume no corpo receptor tem tendência ao crescimento, uma vez que a população também apresenta tendência ao aumento, como mostra a estimativa para 2035 descrita na Tabela 11. A chegada das águas do PISF na bacia do rio Paraíba não desempenharão sua função primordial, caso estas águas após a mistura, estiverem com qualidade inadequada, uma vez que, as mesmas também trazem uma carga de nutrientes proveniente das cidades por onde o rio São Francisco percorre antes de chegar no Eixo Leste do PISF e na bacia do rio Paraíba.

Fazendo parte das condicionantes do PISF, é prevista a criação de Sistemas de Esgotamento Sanitário (SES) nos municípios diretamente beneficiados pelo projeto, por meio do Programa de Apoio ao Saneamento Básico do PISF (PBA 32). Este programa prevê a implantação de sistemas de coleta e tratamento primário de esgoto em todas as cidades identificadas como críticas, sistemas baseados em fossas sépticas nas cidades de pequeno porte e sistemas de coleta, transporte, reciclagem e tratamento de resíduos sólidos em todas as áreas consideradas prioritárias, contando com obras de esgotamento sanitário em 16 municípios em Pernambuco e 30 na Paraíba (PORTELA, 2021).

O Art. 9º da Resolução Conama 430/2011, que trata do controle e condições e padrões de lançamento de efluentes, coíbe, para fins de diluição antes do seu lançamento, a mistura de efluentes com águas de melhor qualidade, como exemplo águas de abastecimento. Ainda na mesma norma, é descrito que os efluentes poderão ser lançados diretamente nos corpos receptores após o devido tratamento desde que obedeçam às condições, padrões e exigências dispostos nesta Resolução e em outras normas aplicáveis (BRASIL, 2011b).

O direito ao tratamento adequado de esgoto é um dos itens do 6º Objetivo para o Desenvolvimento Sustentável (ODS 6), que traz como uma das metas associadas a este ODS, a universalização deste serviço até 2030, eliminando despejos e minimizando o lançamento de materiais e substâncias perigosas, reduzindo pela metade a proporção do lançamento de efluentes não tratados (ONU, 2015).

Neste sentido, foi aprovada a Lei 14.026, de 15 de julho de 2020, considerada um novo marco legal para o saneamento básico no país, e uma das principais mudanças no novo modelo proposto é a universalização do saneamento básico por meio da ampliação do envolvimento de empresas privadas, a partir de licitações e contratos, os quais terão metas de desempenho. Essas licitações podem ser disputadas tanto por empresas públicas como privadas, o que anteriormente era apenas de domínio público. A referida norma tem como meta a expansão do

serviço de coleta e tratamento de esgoto para população e atribui a ANA a competência para editar normas de referência sobre o serviço de saneamento (BRASIL, 2020).

Independentemente do tipo de instituição, estatal ou privada, a garantia da universalização dos serviços relacionados ao saneamento básico depende prioritariamente de que não haja uma descontinuidade e inconstância na aplicação das políticas públicas no nosso país. De acordo com a ANA (2019 d), o tratamento de esgotos é um dos maiores desafios para alcançar as metas do ODS 6.

Para gestão dos recursos hídricos, a falta de legalização e adequado gerenciamento tanto dos lançamentos de esgoto e efluentes, assim como das demandas retiradas, numa bacia hidrográfica, gera carência de dados para um diagnóstico mais real do ambiente e deficiência no controle do uso sustentável da água.

Com relação às demandas de água, sobretudo com finalidade de garantir o abastecimento público e o uso sustentável da água, desde 2014, período de grande escassez hídrica na região, os órgãos competentes a nível federal e estadual, vêm tomando medidas legais para controlar de forma eficiente as vazões captadas nos reservatórios do rio Paraíba, a fim de minimizar os efeitos do seu deplecionamento e garantir o uso prioritário, abastecimento público (LUCENA, 2018). Esses órgãos vêm estabelecendo diversas regras de restrição de uso para irrigação, chegando até a episódios de interrupção total da liberação de água para este fim, mas pouco avanço é observado com relação ao tratamento e lançamento de esgoto e efluentes.

O gerenciamento dos usos prioritários, como abastecimento público, e os secundários como irrigação, vêm sendo controlados de forma conjunta pela ANA e AESA na bacia do rio Paraíba, através de resoluções emitidas de acordo com a oferta de água e o início de operação do PISF (Tabela 12).

Tabela 12 - Resumo das principais resoluções no Alto Curso do rio Paraíba (sistema hídrico Epitácio Pessoa)

Ano	Marco normativo	Instituição	Principais definições	Referência
2017	Resolução n° 1.292/2017	ANA e AESA	CAGEPA: limite de retirada de $1,3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ do reservatório Epitácio Pessoa. Vazão de defluência a jusante do açude para fins de consumo humano e dessedentação animal condicionada as avaliações do volume armazenado. Suspensas as captações de água superficiais e subterrâneas, exceto para os usos descritos acima e atividades de subsistências. Atividades de subsistência com área de cultivo: 0,50 hectare (ha) por usuário. Captação de água: 8,5 h/dia. Culturas: temporárias por sistema de microaspersão e gotejamento.	ANA; AESA (2017d)

	Resolução nº 01/2017	AESA	Suspensão das retiradas do rio Paraíba no trecho entre o reservatório Epitácio Pessoa até Itabaiana/PB. Com normalização do abastecimento na Barragem de Itabaiana são liberadas retiradas em áreas não superior ou igual a 0,5 ha, nos horários da tarifa verde, destinadas à agricultura de subsistência e aquicultura.	AESA (2017)
2018	Resolução nº 12/2018	ANA e AESA	Autorizado descarga de 4.800.000 m ³ do reservatório Epitácio Pessoa para o rio Paraíba, até 30 de junho do mesmo ano, para assegurar a continuidade da operação do abastecimento público à jusante.	ANA; AESA (2018a)
	Resolução nº 63/2018	ANA	Paraíba: vazão máxima de 4,673 m ³ s ⁻¹ , destes 2,79 m ³ s ⁻¹ serão destinados ao abastecimento humano, 0,7 m ³ s ⁻¹ para irrigação e 1,18 m ³ s ⁻¹ para outros fins.	ANA (2018b)
	Resolução 87/2018	ANA e AESA	CAGEPA: limite de retirada de 1,3 m ³ s ⁻¹ do reservatório Epitácio Pessoa. Determinado volume de 25.920 L e área de cultivo de 0,50 ha por usuário. Cultivo em área e volume superior: com comprovação de instalação de equipamento de medição contínua e registro dos volumes captados. Permitido captação de água de 8,5 h/dia e culturas temporárias, exceto mudas e pastagens, e os sistemas de irrigação microaspersão e gotejamento.	ANA; AESA (2018c)
2019/2 020	Termo de Alocação de água 2019/2020	ANA e AESA	A partir de janeiro de 2020 precisarão de nova autorização mediante avaliação da situação hidrológica e reunião com os irrigantes. Liberada vazão de 1,17 m ³ s ⁻¹ para a SIAA – Campina Grande e Cariri. Aquicultura em tanque escavado: área máxima, por usuário, igual a 0,5 ha (sistemas sem recirculação) e 1,0 ha (sistemas com recirculação). Defluência à jusante do reservatório será sempre definida mediante relatório da CAGEPA.	ANA; AESA (2019f)
2020/2 021	Termo de Alocação de água 2020/2021	ANA e AESA	Vazão média anual: Abastecimento público SIAA Monteiro, Congo, Sumé e Camalaú: 0,224 m ³ s ⁻¹ e irrigação com área máxima de 1,0 hectare: 0,3 m ³ s ⁻¹ . Abastecimento público SIAA – Campina Grande e Cariri: 1,30 m ³ s ⁻¹ . Irrigação: área máxima irrigável igual a 1,0 hectare e 0,6 L/s ou 0,0006 m ³ s ⁻¹ por usuário, limitada a 4,0 hectares e 2,4 L/s ou 0,0024 m ³ s ⁻¹ por propriedade, totalizando o máximo de 500,0 hectares e 300 L/s ou 0,3 m ³ s ⁻¹ . Aquicultura em tanques escavados: área máxima, por usuário, igual a 0,5 ha (sistemas sem recirculação) e 1,0 ha (sistemas com recirculação).	ANA; AESA (2020b)
2021/2 022	Termo de Alocação de água 2021/2022	ANA e AESA	Vazão média anual: Abastecimento público SIAA Monteiro, Congo, Sumé e Camalaú: 0,224 m ³ s ⁻¹ e irrigação com área máxima de 1,0 hectare: 0,3 m ³ s ⁻¹ . Abastecimento público SIAA – Campina Grande e Cariri: 1,33 m ³ s ⁻¹ . Irrigação: área máxima irrigável igual a 1,0 hectare e 0,6 L/s ou 0,0006 m ³ s ⁻¹ por usuário, limitada a 4,0 hectares e 2,4 L/s ou 0,0024 m ³ s ⁻¹ por propriedade, totalizando o máximo de 500,0 hectares e 300 L/s ou 0,3 m ³ s ⁻¹ .	ANA; AESA (2021a)

			Aquicultura em tanques escavados: área máxima, por usuário, igual a 0,5 ha (sistemas sem recirculação) e 1,0 ha (sistemas com recirculação).	
--	--	--	--	--

Fonte: A autora (2021)

Como instrumento para gerir a demanda de água na região, sobretudo no açude Epitácio Pessoa, em 2017, deu-se início a implementação das resoluções catalogadas na Tabela 12, principiando com a Resolução Conjunta ANA e AESA n° 1.292/2017, estabelecendo condições de uso de recursos hídricos para o Sistema Hídrico rio Paraíba – Boqueirão, durante o período de pré-operação do PISF (ANA; AESA, 2017d), alterando temporariamente os usos outorgados na Resolução Conjunta ANA e AESA n° 1.397/2016 (ANA, 2016). No final do ano de 2017, a AESA suspende as retiradas do rio Paraíba no trecho entre o reservatório Epitácio Pessoa até a barragem de captação dos sistemas de abastecimento da CAGEPA em Itabaiana/PB (AES A, 2017).

Em 2018, considerando o início da operação do Eixo Leste do PISF, a Resolução n° 12/2018 foi criada autorizando descarga do reservatório Epitácio Pessoa para o rio Paraíba (ANA; AESA, 2018a). Em setembro deste ano, a ANA regulamentou o rateio das águas entre os estados de Pernambuco e Paraíba, no Eixo Leste, apresentando o Plano de Gestão Anual (PGA) do PISF (ANA, 2018b). No PGA, a definição das vazões, considera principalmente o atendimento prioritário, como consumo humano e dessedentação animal.

No final de 2018, ANA e AESA estabeleceram a continuidade do direito de captar vazão média mensal de até 1.300 L/s (1,3 m³/s) pela CAGEPA e suspendeu as captações de água superficiais e subterrâneas no Sistema Hídrico Rio Paraíba - Boqueirão, incluindo os reservatórios Epitácio Pessoa, Poções e Camalaú, exceto para consumo humano, dessedentação animal e atividades de subsistência (ANA; AESA, 2018c).

Os usos alocados no sistema Epitácio Pessoa, num período de vigência de julho/2019 a julho/2020, foram determinados por Termo de Alocação de água 2019/2020 pela AESA, onde mantevem-se as mesmas condições para áreas irrigáveis previstas na Resolução n° 87/2018 até dezembro de 2019 e passou a permitir o uso da água para aquicultura em tanque escavado (ANA; AESA, 2019 f). Nos anos de 2020 a 2022, a área máxima irrigável passa de 0,5 para 1,0 hectare por usuário e para o uso da água na aquicultura permanecem os mesmos critérios descritos no Termo de Alocação anterior (ANA; AESA, 2020b; 2021a).

Para o desenvolvimento da agricultura irrigada, associado ao uso da água, faz-se necessário o uso do solo, e está atividade vem contribuindo com à salinização dos solos e aumento do processo de desertificação devido aos desmatamentos necessários para sua realização. O controle do uso e ocupação do solo, sobretudo no entorno do reservatório Epitácio

Pessoa é tão importante quanto o controle da quantidade de água retirada do reservatório, pois há uma descaracterização eminente da caatinga nessa região (FEITOSA, 2011).

A outorga de uso da água é importante ferramenta para minimizar conflitos entre os usos atuais e futuros da água, realizando um controle quantitativo. Em geral, os conflitos se intensificam à medida que a disponibilidade e a qualidade da água diminuem. Como as características regionais são variáveis, os órgãos gestores devem considerar não somente os critérios hidrológicos e climáticos, mas, também as características socioeconômicas e ecológicas que envolvem os usos múltiplos da água.

4.1.1 Usos e demandas da água no reservatório Poções

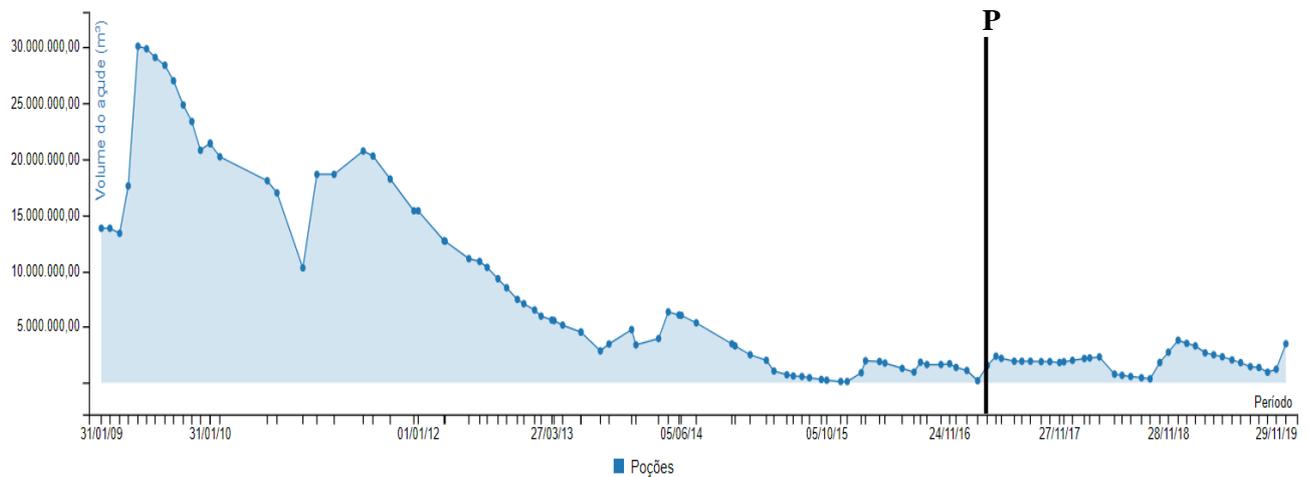
No reservatório Poções, o principal uso é para o abastecimento público. No entanto, outros usos já foram relatados na literatura anteriormente, tais como irrigação e aquicultura (BRITO et al., 2012; FERREIRA, 2016; ANA, 2017a). No ano de 2019, foi identificada apenas uma outorga para direito de uso da água no reservatório Poções, emitida pela ANA, por meio do Cadastro Nacional de Usuários de Recursos Hídricos (CNDARH). O período de vigência foi de 2004 a 2024, com finalidade para o abastecimento público.

A outorga emitida para o reservatório Poções em função do atendimento ao abastecimento público (CAGEPA) demandou volume de 1.055.492 m³/ano, correspondentes à vazão de 0,40 m³ s⁻¹ (ANA, 2019). Esse valor corresponde a uma vazão mensal de 0,033 m³s⁻¹.

Nos últimos 10 anos, o volume de água no reservatório Poções, apresentou redução ao longo do tempo (Figura 20). No ano de 2019 o volume médio foi de 2.210.371 m³. Assim, as demandas de água outorgadas representaram 56% do volume do reservatório.

Em 2021, a ANA divulgou ocorrência de áreas utilizadas para agricultura na área de abrangência do reservatório Poções (Figura 21), bem como no reservatório Camalaú, no município de Camalaú, como consequência da melhora das condições hídricas na área de estudo, proveniente da chegada das água do PISF. Essas áreas correspondem a aproximadamente 33 ha no reservatório Poções e 37,5 ha no reservatório Camalaú (AESA, 2021b). Aproximadamente 25 hectares, em ambos os municípios mencionados, são caracterizados por áreas destinadas ao plantio com extensão superior a 4,0 ha (AESA, 2021b), valor que excede a área máxima estabelecido no último Termo de Alocação de 2021/2022 conforme Tabela 12.

Figura 20 – Volume (m³) mensal do reservatório Poções no período de janeiro/2009 a dezembro/2019; P = Início da operação do PISF



Fonte: Adaptado de AESA (2020).

Figura 21 – Registro fotográfico do reservatório Poções e áreas de agricultura irrigada à direita



(Nogueira da Silva, 2022).

4.1.2 Usos e demandas da água no reservatório Epitácio Pessoa

Foram identificadas 584 outorgas emitidas pela ANA, para direito de uso da água no reservatório Epitácio Pessoa, em 2019. Vale ressaltar que esses dados foram disponibilizados pelo Cadastro Nacional de Usuários de Recursos Hídricos (CNARH) e nele foram observadas lacunas quanto às informações sobre data de vencimento das outorgas.

Dentre os usos, o abastecimento público é considerado prioritário, seguido pela irrigação como uso secundário (ANA, 2019). Esses dados vêm em contramão ao que em geral é

observado no Nordeste e em outros estados do país, onde a demanda para irrigação vem sendo maior que para o abastecimento humano (ANA, 2019c; ANA, 2020c).

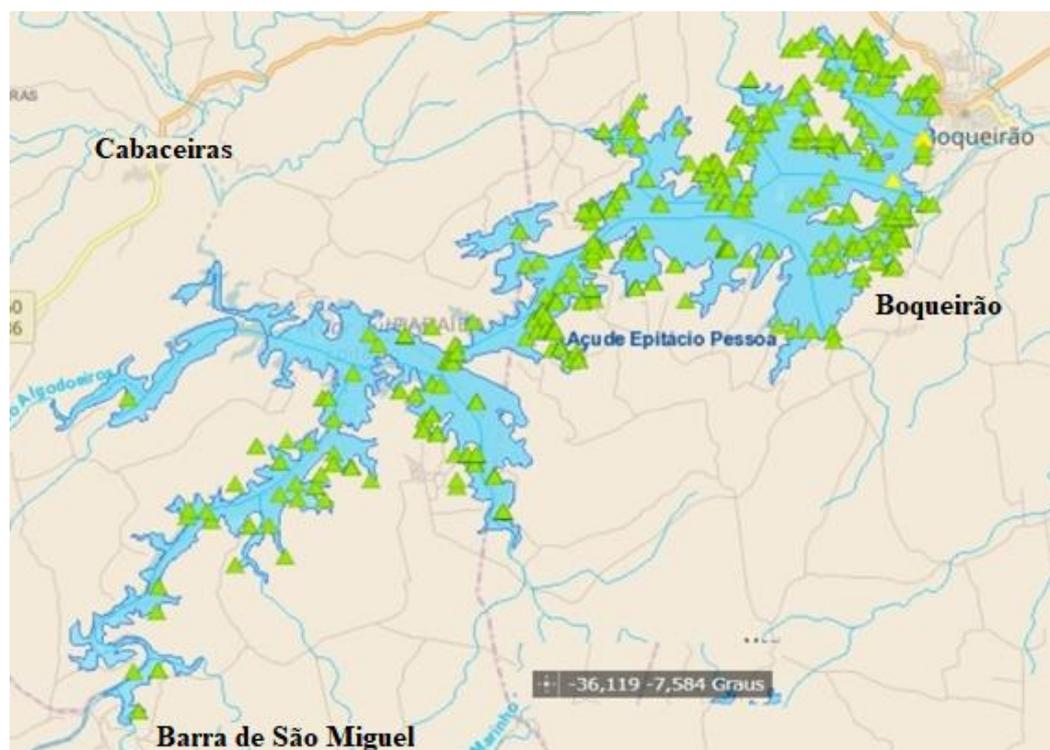
Além da CAGEPA, os demais usuários requerentes do reservatório Epitácio Pessoa encontram-se distribuídos em três municípios, Barra de São Miguel correspondendo a 11%, Boqueirão representando 81% e Cabaceiras, com 8% (Tabela 13 e Figura 22). A outorga emitida para o Abastecimento Público encontra-se na categoria de preventiva, com vazão reservada passível de ser outorgada.

Tabela 13 - Distribuição das outorgas emitidas pela ANA nos municípios de abrangência do reservatório Epitácio Pessoa/PB em 2019

Municípios	Nº de outorgas	Percentual (%)	Finalidade	Categoria
Barra de São Miguel	64	11	Irrigação	Direito de uso
Boqueirão	474	81	Irrigação	Direito de uso
	1	0	Abastecimento público	Preventiva
Cabaceiras	45	8	Irrigação	Direito de uso

Fonte: A Autora (2019).

Figura 22 – Localização das outorgas emitidas para irrigação no reservatório Epitácio Pessoa/PB em 2019



Fonte: ANA (2019).

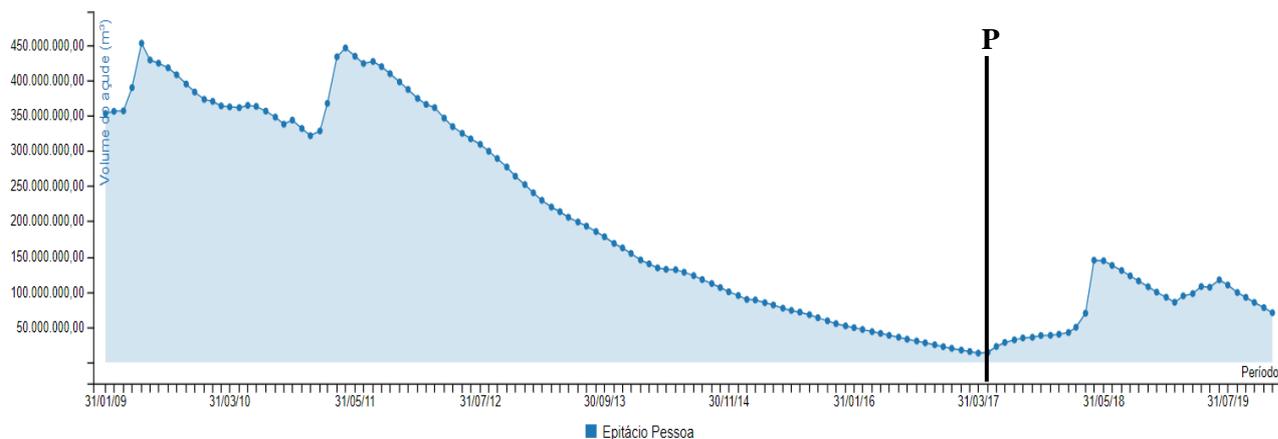
No reservatório Epitácio Pessoa, o abastecimento público representa volume de 8.227.957 m³/ano, seguido pela irrigação, com volume de 5.127.844 m³/ano, que correspondem a 3,2 m³ s⁻¹ (67%) e 2 m³ s⁻¹ (33%), respectivamente (ANA, 2019).

De acordo com a Resolução ANA/AESA nº 87/2018, foi concedida à CAGEPA direito de captar vazão mensal em 2019, de até $1,3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (ANA; AESA 2018 c), observa-se que a outorga emitida para captação de água no reservatório Epitácio foi inferior, apresentando vazão mensal de $0,27 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

Assim como observado no reservatório Poções, o volume de água do reservatório Epitácio Pessoa também apresentou queda ao longo do tempo (Figura 23). Exibindo picos nos anos de 2009 ($452.126.488 \text{ m}^3$) e 2011 ($445.412.742 \text{ m}^3$) e eventos críticos de estiagem entre os anos de 2012 e 2017, chegando a 3,18% ($13.094.571 \text{ m}^3$) do seu volume em março/2017.

Após início da operação do Eixo Leste do PISF em 2017, pode-se observar um leve aumento no volume do reservatório, contudo chegando apenas a 35,13% ($144.639.522 \text{ m}^3$) do seu volume máximo em abril/2018. Em 2019, o volume médio foi de $95.030.598 \text{ m}^3$ no reservatório Epitácio Pessoa. Assim, as demandas de água outorgadas representaram em média 14% do volume total neste ano.

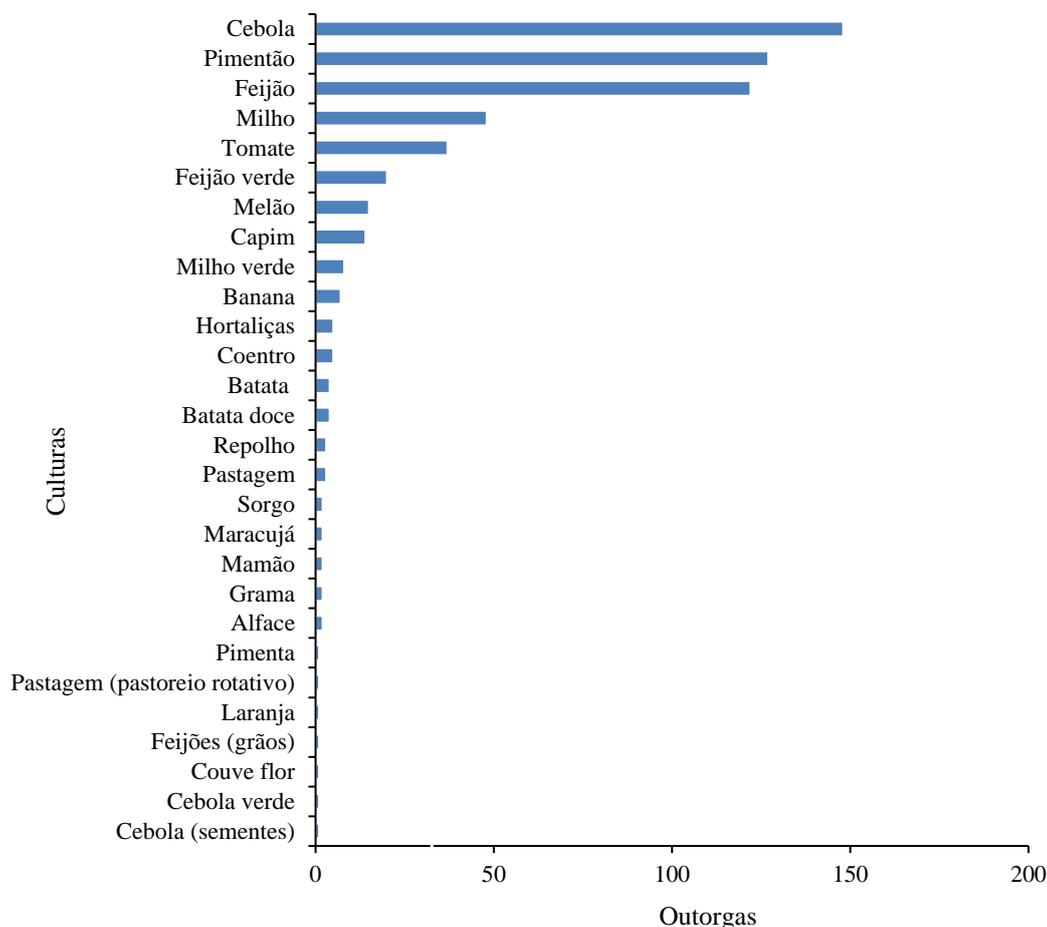
Figura 23 – Volume (m^3) mensal do reservatório Epitácio Pessoa no período de janeiro/2009 a dezembro/2019; P = Início da operação do PISF



Fonte: Adaptado de AESA (2020).

Entre os principais usos da água no reservatório Epitácio Pessoa destaca-se a irrigação, representando praticamente todas as outorgas requeridas. Entre as culturas presentes na região se destacam a cebola (25%), o pimentão (22%) e o feijão (21%) (Figura 24).

Figura 24 – Número de outorgas emitidas e as suas respectivas culturas no reservatório Epitácio Pessoa/PB em 2019



Fonte: A autora (2019).

Em junho de 2019, a ANA divulgou que estava em uso para irrigação no entorno do reservatório Epitácio Pessoa uma área de 240 ha. Neste período estavam cadastrados apenas 480 usuários no REGLA. Em março de 2021, após melhora das condições hídricas na área de estudo, a área utilizada para agricultura era de 496 talhões (aproximadamente 370,5 ha) no entorno do reservatório Epitácio Pessoa, e destes, uma média de 26 ha foram caracterizados como áreas destinadas ao plantio, com extensão superior a 4,0 ha, valor que excede o máximo estabelecido no Termo de Alocação de 2021/2022, conforme Tabela 12 (AESA, 2021b).

As culturas observadas atualmente no reservatório Epitácio Pessoa vêm sendo cultivadas a longo prazo no seu entorno, sobretudo inicialmente pela produção familiar por ribeirinhos, depois agricultura voltada à comercialização (OLIVEIRA, 2007; SILVA, 2012). Outras áreas de agricultura irrigada também se destacam no semiárido, sendo que Oliveira (2019) identificou 28 culturas no reservatório de Sobradinho, no Submédio São Francisco, e as

que mais se destacaram foram os cultivos frutíferos de manga, uva e banana. Nesta região a irrigação é responsável por 70% da demanda de água.

Entre as culturas outorgadas com maior demanda de água individualmente, se destaca a couve-flor, com valor outorgado de $0,0064 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ para seu cultivo e apenas um usuário (Tabela 14), mas a maior demanda de água é para as culturas temporárias de feijão (21%), pimentão (21%) e cebola (26%), uma vez que são as mais cultivadas quando comparados os números de solicitação de outorgas (Figura 25).

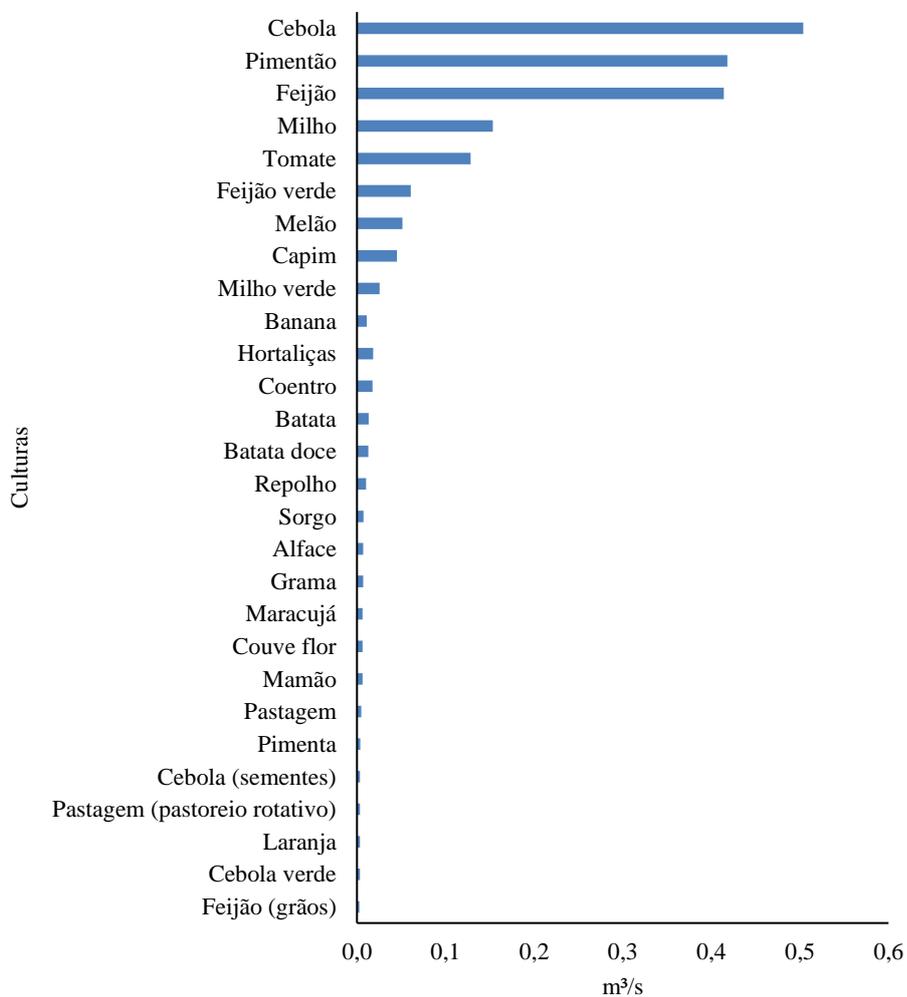
Tabela 14 – Distribuição das culturas, número de outorgas, técnica de irrigação e suas respectivas demandas de vazão anuais nos municípios de abrangência do reservatório Epitácio Pessoa em 2019

Município	Volume Anual (m^3)	Tipo de Cultura	Quantidade	Técnica	Vazão anual total (m^3s^{-1})
Barra de São Miguel	544.377	Banana	1	Aspersão sistema convencional	0,0039
		Feijão verde	2	Gotejamento	0,0058
		Batata doce	2	Gotejamento	0,0063
		Banana	2	Aspersão sistema em malha	0,0073
		Milho	3	Gotejamento	0,0092
		Tomate	4	Gotejamento	0,0134
		Coentro	4	Gotejamento	0,0138
		Cebola	7	Gotejamento	0,0228
		Feijão	13	Gotejamento	0,0423
		Pimentão	26	Gotejamento	0,0826
Município	Volume Anual (m^3)	Tipo de Cultura	Quantidade	Técnica	Vazão anual total ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)
Boqueirão	4.197.480	Feijão (grãos)	1	Gotejamento	0,0026
		Alface	1	Gotejamento	0,0034
		Cebola verde	1	Gotejamento	0,0034
		Laranja	1	Gotejamento	0,0034
		Pastagem (pastoreio rotativo)	1	Gotejamento	0,0034
		Cebola (sementes)	1	Gotejamento	0,0035
		Alface	1	Microaspersão	0,0036
		Coentro	1	Gotejamento	0,0036
		Pimenta	1	Gotejamento	0,0036
		Hortaliças	1	Microaspersão	0,0038
		Pastagem	3	Gotejamento	0,0049
		Mamão	2	Gotejamento	0,0064
		Couve-flor	1	Gotejamento	0,0064
		Maracujá	2	Gotejamento	0,0064
		Gramma	2	Gotejamento	0,0068
		Repolho	2	Gotejamento	0,0070
		Sorgo	2	Microaspersão	0,0072
		Batata	4	Gotejamento	0,0133
		Hortaliças	4	Gotejamento	0,0144
		Milho verde	5	Gotejamento	0,0161
		Capim	5	Microaspersão	0,0180
		Capim	8	Gotejamento	0,0273
		Feijão verde	16	Gotejamento	0,0489
		Melão	15	Gotejamento	0,0512
Tomate	31	Gotejamento	0,1082		
Milho	39	Gotejamento	0,1254		
Pimentão	84	Gotejamento	0,2800		

Município	Volume Anual (m ³)	Tipo de Cultura	Quantidade	Técnica	Vazão anual total (m ³ s ⁻¹)
		Feijão	104	Gotejamento	0,3549
		Cebola	135	Gotejamento	0,4608
Cabaceiras	385.987	Capim	1	Gotejamento	0,0033
		Repolho	1	Gotejamento	0,0034
		Feijão verde	2	Gotejamento	0,0060
		Batata doce	2	Gotejamento	0,0065
		Tomate	2	Gotejamento	0,0069
		Milho verde	3	Gotejamento	0,0095
		Feijão	5	Gotejamento	0,0167
		Milho	6	Gotejamento	0,0189
		Cebola	6	Gotejamento	0,0201
		Pimentão	17	Gotejamento	0,0556

Fonte: A Autora (2019).

Figura 25 - Demanda de água (m³/s) por cultura (outorga) no reservatório Epitácio Pessoa

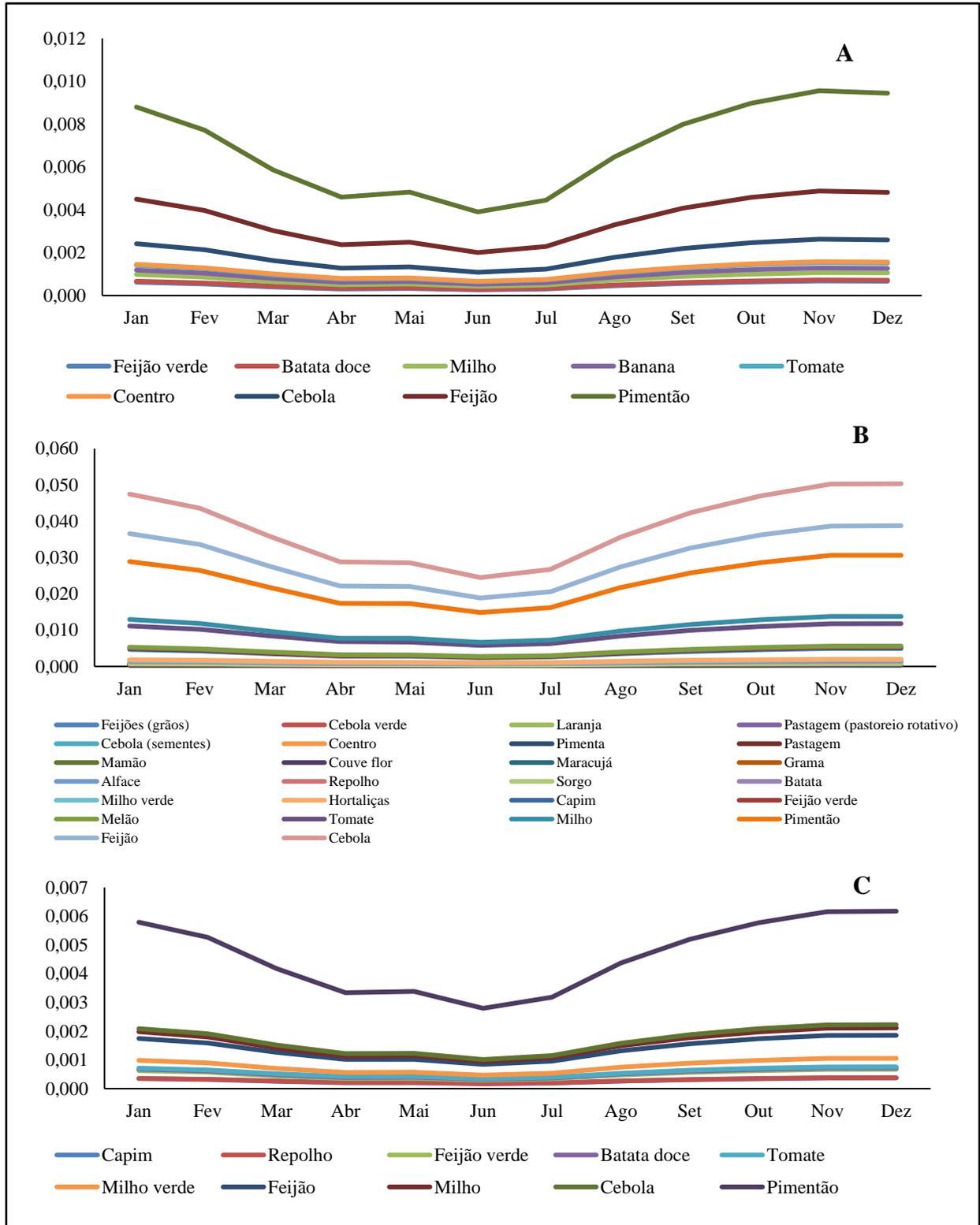


Fonte: A Autora (2019).

Quando observada a temporalidade da demanda de água, para ambos os municípios, os meses incluídos no período seco para região (ARAÚJO et al., 2009), são aqueles que foram

notados com maior demanda dos recursos hídricos (Figura 26). Uma vez que nesse período há maior evapotranspiração, maior infiltração da água pelo solo e menor precipitação.

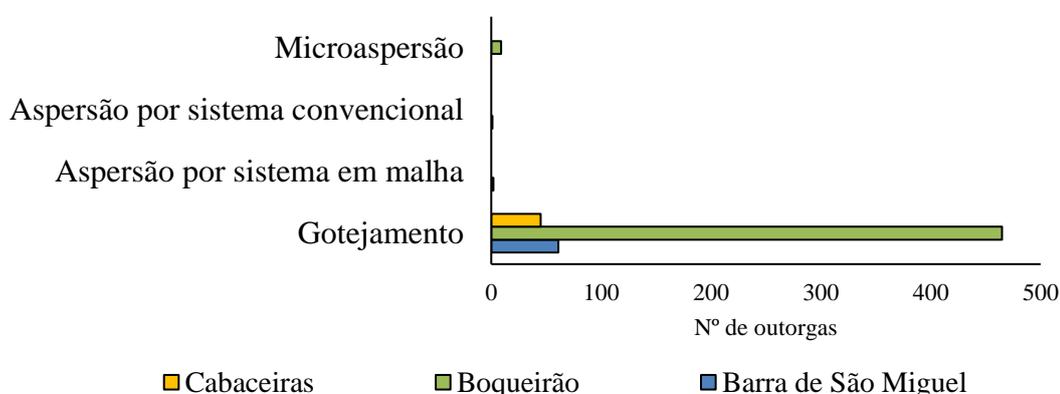
Figura 26 - Demanda de água (m³/s) mensal, por cultura, nos municípios de abrangência do reservatório Epitácio Pessoa. A: Barra de São Miguel; B: Boqueirão; e C: Cabaceiras



Fonte: A autora (2019).

Em relação aos sistemas de irrigação mais utilizados, se destaca a técnica de gotejamento, representando 98% dos métodos utilizados pelos usuários outorgantes do reservatório Eptácio Pessoa (Figura 27). Quando observada a distribuição das técnicas de irrigação entre os municípios, nota-se que em Barra de São Miguel, 95% dos usuários utilizam a técnica de gotejamento, 3% fazem uso da aspersão por sistema em malha e 2% a aspersão em sistema convencional (Tabela 15). No município de Boqueirão a técnica de gotejamento corresponde a 98% e a de microaspersão é utilizada em apenas 2% dos cultivos. Em Cabaceiras, foi observada apenas o uso do gotejamento.

Figura 27 – Distribuição dos métodos de irrigação nos municípios de abrangência do reservatório Eptácio Pessoa



Fonte: A autora (2019).

Tabela 15 – Demanda de água por técnica de irrigação nos municípios de abrangência do reservatório Eptácio Pessoa

Municípios	Técnica	Vazão anual total ($m^3 s^{-1}$)	%
Barra de São Miguel	Gotejamento	0,1961	95
	Aspersão por sistema em malha	0,0073	3
	Aspersão sistema convencional	0,0039	2
Boqueirão	Gotejamento	1,5655	98
	Microaspersão	0,0326	2
Cabaceiras	Gotejamento	0,1469	100

Fonte: A Autora (2019).

Por ser a mais utilizada, é consequente que a técnica do gotejamento seja observada como a que mais demanda quantidade de recursos hídricos (Tabela 15). Mas, de acordo com a Resolução 707/2004 da ANA (ANA, 2004), essa técnica é considerada a mais eficiente entre as mais utilizadas para irrigação no Brasil, com eficiência de referência de 95% (Tabela 16).

A avaliação das técnicas de irrigação é de suma importância pois contribuem para garantia do uso mais eficiente e sustentável da água. Segundo Tucci e Mendes (2006), as

tecnologias modernas de irrigação podem reduzir o consumo da água em 50%, comparadas aos métodos tradicionais.

Tabela 16 – Valores de referência da eficiência das técnicas de irrigação estabelecido pela ANA

Técnica de irrigação	Eficiência de referência (%)
Sulcos	> 60
Inundação	> 50
Aspersão convencional	> 80
Aspersão em malha	> 85
Microaspersão	> 90
Gotejamento	> 95
Tubos perfurados	> 85

Fonte: ANA (2004).

Como visto anteriormente, para as atividades de agricultura irrigada foram estabelecidas condições de usos da água do reservatório na pré-operação do PISF pela ANA e AESA (ANA; AESA, 2018c). Tais condições incluíam limite de captações até no máximo 8,5 h/dia, no entanto no banco de dados disponibilizado pela ANA, pode-se observar que as captações eram realizadas por 13 h/dia. Além de estar determinada a permissão apenas de culturas temporárias, mudas e pastagens, foram observadas liberação de outorgas para culturas permanentes, tais como: laranja, banana, maracujá, mamão e pimenta.

Além dos pontos destacados que não se encontram em consonância com as normas legais, temos também a emissão de três outorgas com o uso de técnicas de irrigação como aspersão, para cultivo de banana, a qual não está permitida pela Resolução 87/2018 (ANA; AESA, 2018c).

Na pesquisa realizada por Santos e Curi (2014), sobre estudo da sustentabilidade do atendimento das demandas dos recursos hídricos do reservatório Epitácio Pessoa, sem considerar as águas do PISF, foram criados três cenários considerando volume mínimo de 58% da capacidade de armazenamento de água: Cenário 1: uso para abastecimento urbano; Cenário 2: abastecimento urbano e agricultura irrigada e Cenário 3: abastecimento urbano, agricultura irrigada e perenização do rio a jusante do açude. Os resultados revelaram que as demandas de abastecimento urbano nessas condições de volume de água poderão ser atendidas com 100% de garantia, em todos os cenários propostos para os 10 anos estudados.

Os referidos autores concluíram que a atividade agrícola pode ser desenvolvida considerando a afluência, sem comprometer a demanda de abastecimento urbano das cidades (cenário 2), condicionada aos estudos de quais culturas agrícolas devem ser cultivadas e em

qual época do ano. Apenas a demanda pela AESA para perenização do rio a jusante do reservatório não é sustentável, podendo não ser atendida por três anos consecutivos (SANTOS e CURI, 2014). De acordo com a ANA (2019d), para manutenção ou desenvolvimento das áreas irrigadas requer que seja dada especial atenção à redução de desperdícios, controle das perdas e incentivos à Educação Ambiental.

4.2 ANÁLISE DA QUALIDADE DA ÁGUA DO ALTO CURSO DO RIO PARAÍBA

4.2.1 Avaliação físico-química da água

Dentre os parâmetros físico-químicos e biológico analisados, o fósforo total, a clorofila- α , os SDT, os coliformes termotolerantes, a turbidez, o OD e a DBO, excederam os limites recomendados pela Resolução Conama 357/05 para corpos d'água de classe 2 (BRASIL, 2005), com destaque para o fósforo total, os SDT e a DBO, que ultrapassaram seus respectivos limites na maior parte dos pontos de amostragem, assim como, ao longo do monitoramento.

Com relação à sazonalidade, os parâmetros exibiram tendência a taxas mais elevadas no período seco, exceto o pH e a clorofila- α , destacando os anos de 2014 a 2016, onde observaram-se reduções nos volumes de água na região de estudo, devido à estiagem prolongada.

De acordo com a AESA (2019), os índices pluviométricos têm papel relevante na qualidade da água no semiárido nordestino, pois em períodos de escassez hídrica, como os ocorridos entre 2012 e 2016, levaram à diminuição do volume de água e como consequência, redução da qualidade da água. Esse regime hidrológico contribui para a elevação das concentrações de nutrientes, como o fósforo, nos mananciais (ANA, 2019c).

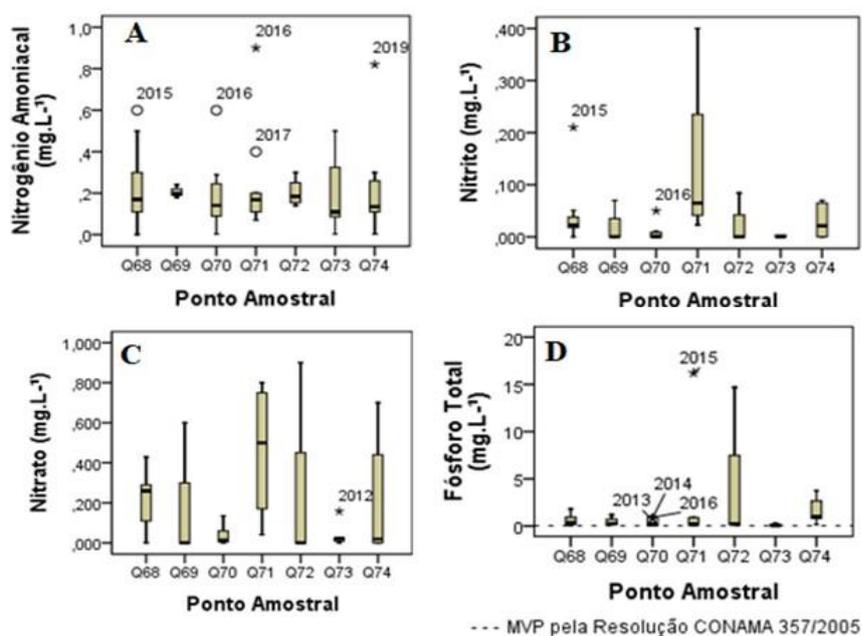
Outros trabalhos também observaram que o regime hidrológico e as mudanças climáticas influenciam diretamente nas concentrações de nutrientes, alterando a qualidade da água em corpos hídricos do Nordeste (BARBOSA et al., 2006; BARBOSA et al., 2016; GOMES et al., 2016; AESA, 2019; ANA, 2019b). Uma vez que a redução do volume de água acarreta diminuição da diluição da carga orgânica proveniente dos esgotos e efluentes lançados nos corpos de água, aumento da temperatura e da resistência térmica à circulação, promovendo aumento das florações do fitoplâncton (GOMES et al., 2016).

O fósforo e o nitrogênio são considerados indicadores de impactos ambientais por serem os principais elementos contribuintes para a aceleração do processo de eutrofização dos corpos hídricos, promovendo o crescimento acelerado do fitoplâncton, e consequentemente, variações significativas na concentração de oxigênio dissolvido na água (AZEVEDO et al., 2016;

SHIMIZU et al., 2020). Ao contrário do fósforo, o nitrogênio, assim como o nitrito e o nitrato, apresentou concentrações dentro dos limites estabelecidos pela Resolução Conama 357/05 (Figura 28).

Em ambientes lânticos, geralmente, as altas taxas de fósforo podem estar relacionadas à elevada evaporação, baixas concentrações de nitrogênio à altas temperaturas, comumente observadas no semiárido, responsáveis por acelerar a atuação microbiana e o processo de desnitrificação (ESTEVES, 2011; GOMES et al., 2016).

Figura 28 - Variação sazonal dos parâmetros físico-químicos no Alto Curso do rio Paraíba, no período de 2011 a 2019: A - Nitrogênio amoniacal total; B - Nitrito; C - Nitrato; e D - Fósforo total e o máximo valor permitido (MVP) de $0,030 \text{ mg L}^{-1}$ para ambientes lânticos, estabelecido pela Resolução Conama 357/2005



Fonte: A autora (2020).

As estações de amostragem que registraram as concentrações mais elevadas do fósforo total foram Q71 e Q72, no trecho a jusante do reservatório Camalaú e a montante do reservatório Epitácio Pessoa, ambas em 2015, e em Q74, a jusante do referido reservatório, em 2013, e sua variação ao longo do monitoramento foi de $0,01 \text{ mg L}^{-1}$ a $16,2 \text{ mg L}^{-1}$, em Q70 (2011) e Q71 (2015), respectivamente (Figura 28 D).

Outros estudos avaliando a qualidade da água em reservatórios no semiárido paraibano, constataram que o aumento na concentração do fósforo total e dos sólidos dissolvidos totais pode estar relacionado à redução do volume de água nos períodos de estiagem (BARBOSA et al., 2016; GOMES et al., 2016). Já para o nitrogênio total, Gomes et al. (2016) observaram que houve decréscimo nas concentrações, o que pode ser reflexo das altas temperaturas que

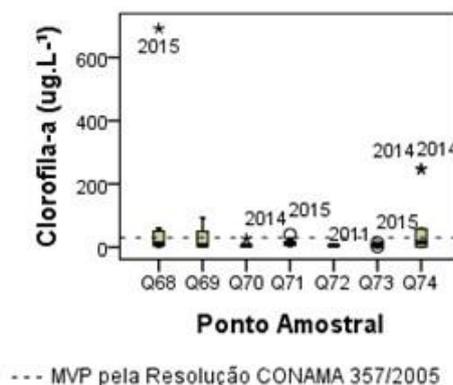
aceleraram o processo de desnitrificação e da suspensão das atividades de irrigação e práticas agrícolas pela ANA no entorno do reservatório durante o período de estudo (2015).

De acordo com Pômpeo (2008), outro fator que pode estar relacionado a ocorrência de baixos valores de nitrogênio é a presença de extensos bancos de macrófitas nos reservatórios. As macrófitas aquáticas assimilam e incorporam os nutrientes à sua biomassa, podendo contribuir momentaneamente, para redução desses compostos na coluna de água (ESTEVEZ, 2011).

O fósforo, como um dos principais fatores limitantes nos ecossistemas aquáticos, é indispensável para o desenvolvimento do fitoplâncton (TUNDISI; MATSUMURA-TUNDISI, 2008), com isso as concentrações desse parâmetro também possuem correlação com a clorofila- α . Esta variou de 0,002 a 691,5 $\mu\text{g L}^{-1}$, excedendo o limite de 30 $\mu\text{g L}^{-1}$ recomendado pela Legislação, principalmente nos anos de 2014 e 2015, com destaque para os pontos Q68 e Q74, no reservatório Poções e a jusante do reservatório Epitácio Pessoa (Figura 29).

De acordo com Barbosa et al. (2016), no reservatório Epitácio Pessoa, a redução do nível da água nos longos períodos de estiagem, pelo qual veio passando a região, contribui para o aumento da concentração de nutrientes e do fitoplâncton, refletido pelo acréscimo da clorofila- α na água. A clorofila- α excedeu o limite de 30 $\mu\text{g L}^{-1}$ estabelecido pela resolução vigente nos anos de 2011 (Q68 e Q74), 2013 (Q68 e Q74), 2014 (Q68, Q69 e Q74), 2015 (Q68, Q71 e Q74), 2016 (Q68) e 2019 (Q68) (Figure 3). Os pontos Q68 e Q74 foram os mais expressivos, com valores máximos de 691,5 $\mu\text{g L}^{-1}$ e 248,3 $\mu\text{g L}^{-1}$, respectivamente.

Figura 29 - Variação sazonal da clorofila- α no Alto Curso do rio Paraíba, no período de 2011 a 2019, e o limite máximo de 30 $\mu\text{g L}^{-1}$ estabelecido pela Resolução Conama 357/2005



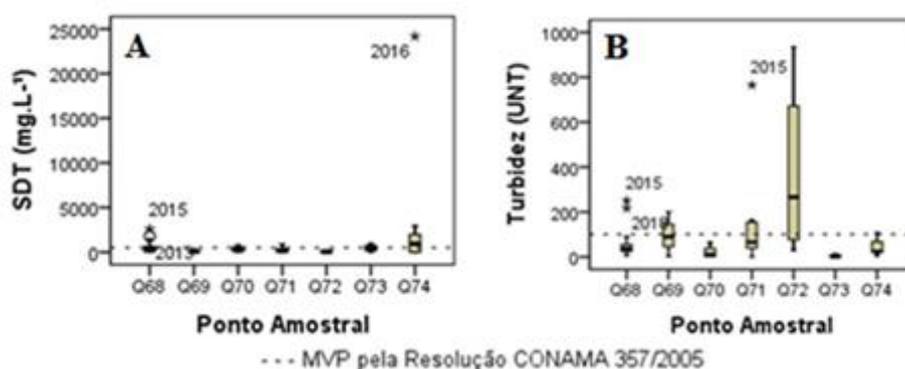
Fonte: A autora (2020).

Os sólidos dissolvidos totais apresentaram o mesmo padrão observado para os parâmetros citados anteriormente, com maiores concentrações observadas nos períodos de extremo climático na região (2013 a 2016) e destaque para as estações Q68 e Q74 (Figura 30

A). A concentração mínima observada foi de 0,25 mg L⁻¹ e máxima de 24.143 mg L⁻¹, nas estações Q73 (2018) e Q74 (2016), respectivamente. Apenas nos pontos a jusante do reservatório Poções (Q69) e a montante do reservatório Epitácio Pessoa (Q72), não apresentaram valores acima do limite de 500 mg L⁻¹ recomendado pela legislação. Gomes et al. (2016), constataram em sua pesquisa no reservatório Epitácio Pessoa, que a redução do volume de água do reservatório favoreceu o aumento nos valores de sólidos totais dissolvido.

A turbidez exibiu picos em 2015, com 934,97 UNT em Q72 e 765 UNT em Q71, refletindo a presença de sólidos dissolvidos na coluna de água, com taxas mais elevadas neste ano, mas habitualmente esteve abaixo do limite da legislação brasileira, apresentando pontos ultrapassando o valor de 100 UNT a partir de 2014 (Figura 30).

Figura 30 - Variação sazonal dos parâmetros físico-químicos no Alto Curso do rio Paraíba, no período de 2011 a 2019, e seus respectivos limites estabelecidos pela Resolução Conama 357/2005: A - Sólidos dissolvidos totais; B - Turbidez



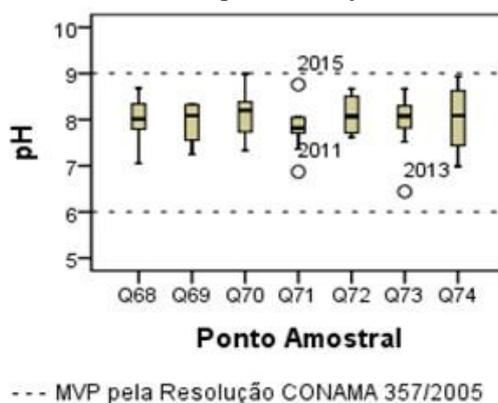
Fonte: A autora (2020).

As altas taxas de evaporação típicas da região influenciam significativamente a redução do volume e favorecem concentração de solutos, material particulado e nutrientes na água dos corpos hídricos. Assim, os corpos de água dessa região são geralmente turvos e apresentam propensão à eutrofização (BARBOSA et al. 2012). Os pontos onde foram observadas altas taxas de turbidez (Q71 e Q72), são trechos lóticos a intermitentes, com baixa profundidade, sobretudo nos períodos de escassez, e as altas concentrações de turbidez observadas nesses pontos não foram suficientes para influenciar a turbidez da água no reservatório Epitácio Pessoa, tanto pela questão do maior volume de água no reservatório, quanto pela interrupção do fluxo de água entre esses trechos nos períodos de seca.

O pH também se apresentou dentro do recomendado, com variações dentro da faixa de 6,0 a 9,0 (Figura 31). Este parâmetro influencia na dinâmica de vários nutrientes na coluna de água, como o fósforo, que pode ser liberado do sedimento para a água em maior concentração em condições mais alcalinas do que ácidas ou neutras (WU et al., 2014). Santos (2017) atribui

a tendência de pH mais alcalino em reservatórios do semiárido à redução no volume de água e ocorrência de carbonatos e bicarbonatos no solo, combinado às altas taxas de evaporação.

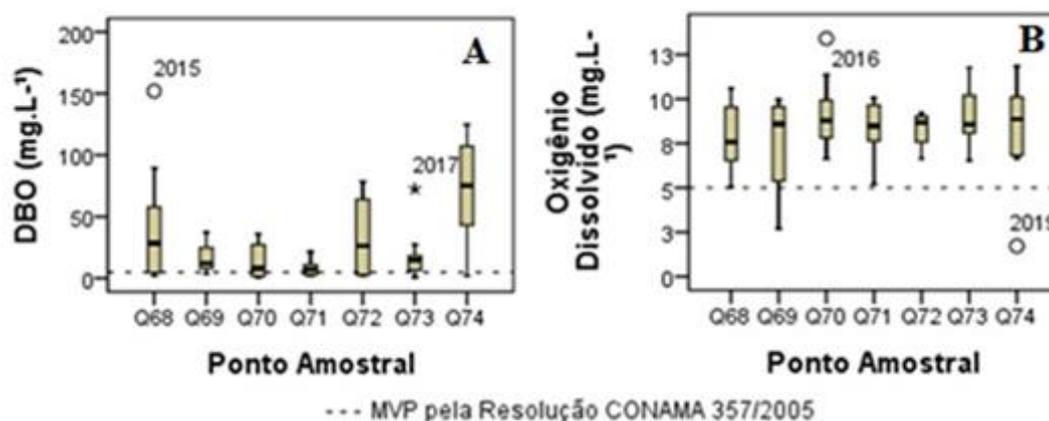
Figura 31 - Variação sazonal do pH no Alto Curso do rio Paraíba, no período de 2011 a 2019, e a faixa limite de 6,0 a 9,0 estabelecida pela Resolução Conama 357/2005



Fonte: A autora (2020).

A DBO ocorreu com valores superiores ao limite preconizado de $5,0 \text{ mg L}^{-1} \text{ O}_2$, com concentrações máximas de $152 \text{ mg L}^{-1} \text{ O}_2$, em Q68 (2015) e $124,8 \text{ mg L}^{-1} \text{ O}_2$, em Q74 (2014) (Figura 32 A). O oxigênio dissolvido, essencial à existência da vida aquática, esteve dentro do padrão indicado pela legislação para corpos de água classe 2, acima de $5,0 \text{ mg L}^{-1} \text{ O}_2$, com exceção da estação Q69 (2014), com $2,69 \text{ mg L}^{-1} \text{ O}_2$ e em Q74 (2019), com apenas $1,72 \text{ mg L}^{-1} \text{ O}_2$ (Figura 32 B).

Figura 32 - Variação sazonal dos parâmetros físico-químicos no Alto Curso do rio Paraíba, no período de 2011 a 2019, e seus respectivos limites estabelecidos pela Resolução Conama 357/2005: A – DBO; B – OD



Fonte: A autora (2020).

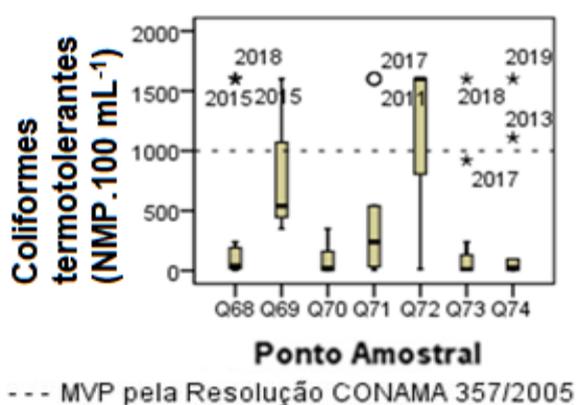
Em ambientes naturais e oligotróficos a concentração de DBO é baixa e contrária aos corpos de água que recebem lançamento de esgoto. Os resultados observados refletem a

situação do esgotamento sanitário nos municípios ao longo do rio Paraíba, que se encontra insatisfatória, com baixos índices de atendimento ao tratamento de esgoto e em destaque os municípios de Monteiro e Boqueirão, com as mais altas cargas de lançamento de DBO (ANA, 2017b).

A destruição das matas ciliares no entorno da bacia do rio Paraíba, responsável por controlar o assoreamento, barrando o aporte de nutrientes e poluentes para o rio, ocorre em grande extensão do seu curso (AESAs, 2004). Além disso, o uso de defensivos agrícolas e fertilizantes pelos cultivos no entorno dos reservatórios também vêm contribuindo para o aumento dos impactos na qualidade da água e na dinâmica dos organismos aquáticos (SILVA et al., 2014). Outros autores que observaram altas concentrações de DBO em reservatórios no semiárido nordestino, atribuíram ao lançamento de efluentes e ao aporte de sedimentos provenientes dos processos de erosão ou atividade agrícola (FREIRE et al., 2013; CUNHA et al., 2019; OLIVEIRA, 2019).

O lançamento de esgoto e efluentes, um dos principais responsáveis por contribuir com a eutrofização (LEANDRO; ROCHA, 2019), tem seus impactos também refletidos pela concentração de coliformes termotolerantes na água, e pode ser agravado pelas altas temperaturas e baixo volume de água, reduzindo a capacidade de autodepuração dos corpos hídricos (CUNHA et al., 2019). Essa estimativa ocorre a partir da análise de um grupo de bactérias consideradas importantes indicadores de contaminação fecal e de lançamento de esgotos sem tratamento nos corpos hídricos (CETESB, 2018). Nesta pesquisa foram observados valores acima de $1.600 \text{ NMP } 100 \text{ mL}^{-1}$ no período de 2011 (Q71), 2014 (Q69), 2015 (Q68 e Q72), 2017 (Q71 e Q72), 2018 (Q68 e Q73) e 2019 (Q72 e Q74) (Figura 33).

Figura 33 - Variação sazonal dos coliformes termotolerantes no Alto Curso do rio Paraíba, no período de 2011 a 2019, e o limite máximo de 1.000 coliformes termotolerantes por 100 mililitros de amostra estabelecido pela Resolução Conama 357/2005

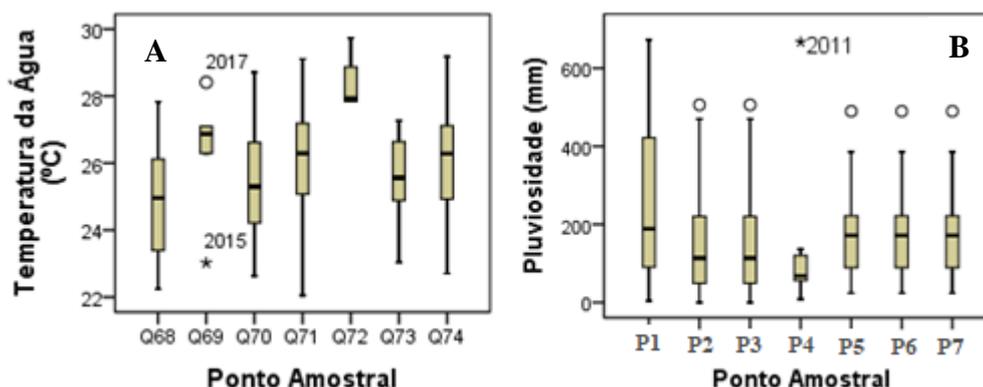


Fonte: A autora (2020).

Apenas o reservatório Camalaú (Q70) se manteve com valores abaixo do preconizado pela legislação brasileira. No entanto, devido à amostragem ter sido realizada semestralmente, com apenas duas amostras por ano, impossibilita a comparação com a legislação, que diz que não deverá ser excedido um limite de 1.000 coliformes termotolerantes por 100 mililitros, em 80% ou mais de pelo menos seis amostras coletadas, durante o período de um ano.

A temperatura da água apresentou comportamento semelhante nos pontos de amostragem, variando de 22,05 °C (Q71) em 2011 a 29,73 °C (Q72) em 2019 (Figura 34 A). A precipitação média variou de 0,0 mm a 672,5 mm (2011), no Alto Curso do rio Paraíba (Figura 34 B).

Figura 34 – Variação sazonal das características físicas no Alto Curso do rio Paraíba: A – Temperatura da água (2011 a 2019); B – Precipitação média (2000 a 2019), onde: P1 e P2 - PCD Monteiro; P3 - PCD Camalaú; P4 - PCD Congo; P5 - Caraúbas e São Domingos do Cariri; P6 e P7 - PCD Boqueirão



Fonte: A autora (2020).

No entanto, um fato que chama atenção no semiárido, é que em alguns períodos caracterizados como chuvosos, não ocorreram precipitações significativas na área de estudo (AESAs, 2021a). Apesar das precipitações pluviométricas mais acentuadas no semiárido ocorrerem somente numa média de três meses durante o ano (MOURA et al., 2007; MOURA et al., 2013), entre 2012 e 2016, foi observada baixa precipitação, com papel relevante na dinâmica da concentração dos nutrientes (SOBRAL et al., 2018; CAVALCANTE et al., 2021). Durante esse período, a precipitação média mensal variou de 0,0 mm a 43,7 mm.

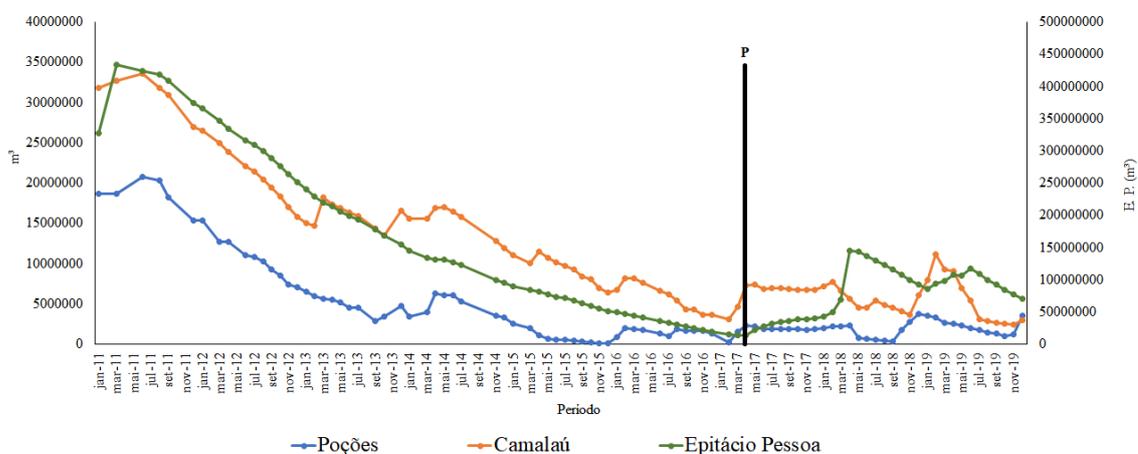
Os pontos amostrais descritos na Figura 34 B, correspondem às Plataformas de Coleta de Dados (PCDs) presentes nos municípios situados na sub-bacia, Alto Curso do rio Paraíba, com dados disponibilizados pela AESA.

Em decorrência dos períodos de estiagem, pode-se observar uma queda no volume dos reservatórios na região de estudo (AESAs, 2021a). Os volumes de água nos reservatórios

Poções, Camalaú e Epitácio Pessoa diminuíram nos últimos 10 anos (Figura 35). O reservatório Epitácio Pessoa apresentou pico no volume nos anos de 2009 (452,126,488 m³) e 2011 (445,412,742 m³) e eventos críticos de seca entre no período de 2013 a 2017, entrando em colapso com 3,18% (13,094,571 m³) do seu volume em março/2017. Após o início da operação do PISF no Eixo Leste, em 2017, pode-se observar um ligeiro aumento no volume do reservatório Epitácio Pessoa, porém atingindo apenas 35,13% (144.639,522 m³) do seu volume máximo em abril/2018 (AESA, 2021a).

Araújo et al. (2009) e Sobral et al. (2018), chamam atenção para ocorrência de uma modificação importante no padrão da precipitação média da bacia do rio Paraíba e no semiárido nordestino, passando a observar mais períodos de anos secos do que úmidos, enfatizando a importância da gestão eficiente e adequação da água na bacia, pois se essa tendência de crescimento de anos secos se configurarem como padrão, o problema do abastecimento se consolidará impactando negativamente no atendimento às demandas.

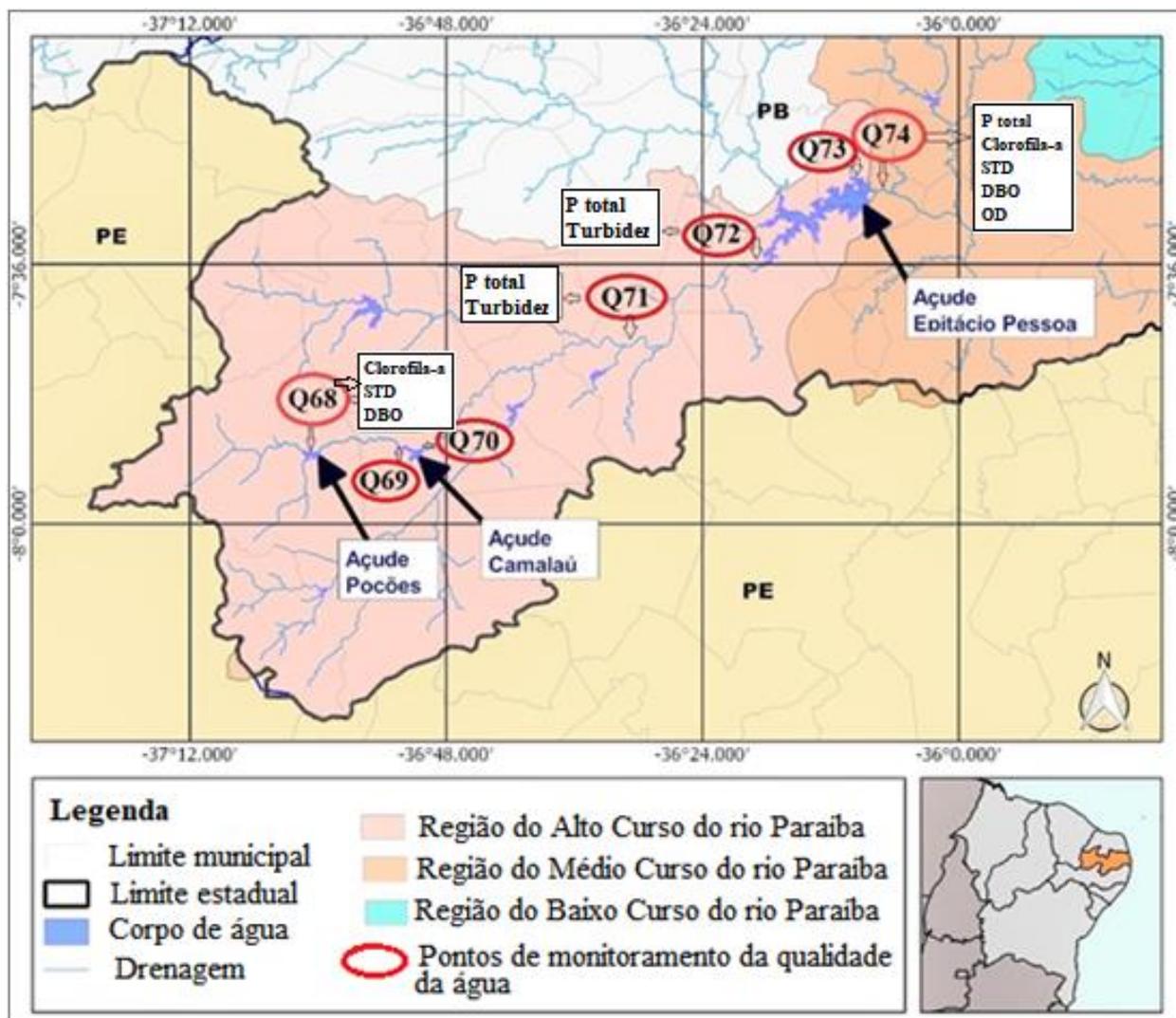
Figura 35 – Volume mensal (m³) dos reservatórios estudados no Alto Curso do rio Paraíba, de 2009 a 2019. P: Início da operação do PISF



Fonte: A autora (2020).

A análise das características físico-químicas e biológica da água no Alto Curso do rio Paraíba mostra que a crise hídrica no semiárido não é apenas quantitativa, mas também qualitativa, já que a qualidade das águas, principalmente em reservatórios de abastecimento público encontra-se muitas vezes com indícios de eutrofização. Alguns pontos se destacaram, como mais críticos, com relação aos parâmetros da qualidade da água, fora do requerido pela Resolução Conama 357/05 (Figura 36).

Figura 36 – Localização das estações de amostragem mais críticas quanto aos parâmetros da qualidade da água. Q68-Reservatório Poçoões; Q69-Jusante do reservatório Poçoões; Q70- Reservatório Camalaú; Q71-Jusante do reservatório Camalaú; Q72-Montante do reservatório Epitácio Pessoa; Q73- Reservatório Epitácio Pessoa e Q74- Jusante do reservatório Epitácio Pessoa



Fonte: A autora (2020).

Em relação à chegada das águas do rio São Francisco na Bacia do rio Paraíba, em 2017, pode-se observar durante o período estudado, uma redução na concentração de alguns parâmetros como o fósforo, a clorofila- α e os sólidos dissolvidos totais. Apenas os sólidos dissolvidos totais e a clorofila- α predominaram com concentrações abaixo do limite máximo recomendado pela Resolução Conama 357/05, após início da operação do PISF. No entanto, é necessário a realização de monitoramento contínuo para possibilitar estudos complementares nos próximos anos, a fim de observar as alterações na qualidade da água do rio Paraíba.

Oliveira (2018), observou que a transposição das águas do rio São Francisco para o rio Paraíba tem alterado a qualidade das águas nos reservatórios. A autora constatou um aumento nas concentrações de nutrientes nos três açudes estudados (Poçoões, Camalaú e Epitácio Pessoa),

principalmente fósforo total, fosfato, amônia e nitrato no açude Poções e nitrito no Epitácio Pessoa. Enquanto, no estudo de Andrade et al. (2017), no primeiro ano de operação, foi observado que as águas da transposição do Rio São Francisco melhoraram a qualidade da água do açude Epitácio Pessoa, apresentando resultados de pH, condutividade elétrica e oxigênio dissolvido mais satisfatórios após início da operação do PISF.

Vale destacar que investimentos em melhorias na qualidade das águas e do saneamento básico na Bacia do Rio São Francisco são imprescindíveis. O tratamento de esgoto doméstico e efluentes é precário e estes são lançados no rio de forma inadequada, contribuindo para eutrofização das águas. Moraes et al. (2011), constataram no reservatório de Itaparica, ponto de captação do Eixo Leste, que parâmetros indicadores da qualidade da água, como o fósforo total vêm se apresentando fora do estabelecido pela legislação brasileira.

A melhoria das redes de monitoramento das águas superficiais, assim como, cooperação entre os operadores para padronização e ampliação dessa rede é estratégia importante para gestão sustentável dos recursos hídricos no semiárido.

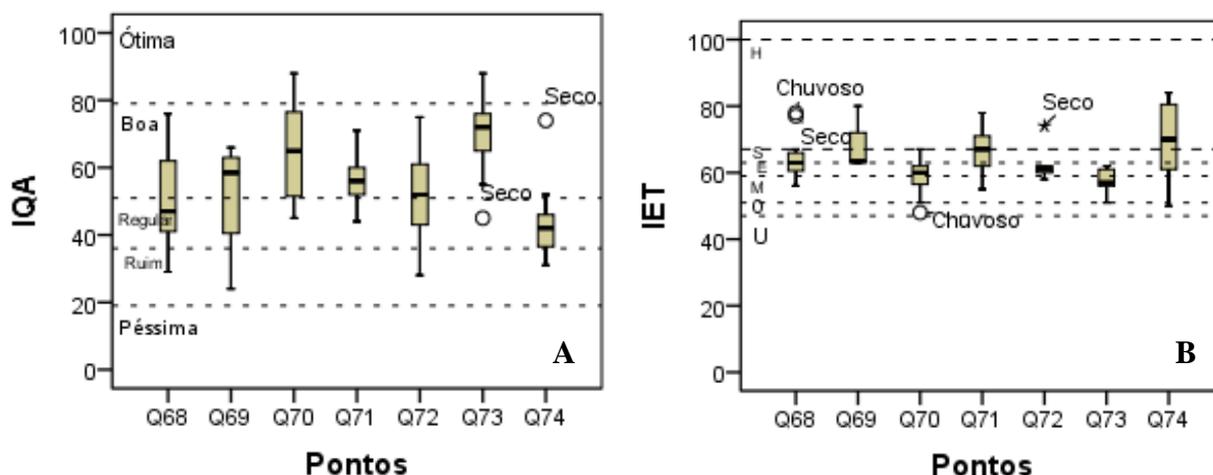
Existe um sistema de barragens no curso do rio São Francisco e no rio Paraíba, que interfere na dinâmica do transporte de nutrientes nestas bacias hidrográficas. É fundamental considerar a análise após um período de alta pluviosidade ou aumento da vazão nos monitoramentos, quando há transporte de altas concentrações de nutrientes, como fósforo e nitrogênio, ao longo do rio, pelas correntes aumentadas pela chuva ou vazão (SHIMIZU et al., 2020).

4.2.2 Índice de Qualidade da Água (IQA) e Índice de Estado Trófico (IET)

A análise do IQA apontou que 55% das ocorrências se enquadraram na categoria Boa, 30% na Regular, (Q68 e Q74), 8% na Ruim (Q74) e 7% na Ótima (Q73). A classificação Péssima não foi atribuída a nenhum ponto.

O IQA Ótima pode ser observado no reservatório Camalaú (Q70), em 2011 e 2019 e no reservatório Epitácio Pessoa (Q73), em 2011, no período seco, e em 2019. Nestes períodos o índice de trofia do ponto Q70, variou entre oligotrófico e mesotrófico, e em Q73, foi classificado como mesotrófico (Figura 37 A e Tabela 17).

Figura 37 – Variação sazonal do IQA e IET no Alto Curso do rio Paraíba, no período de 2011 a 2019: A - Índice de qualidade da água (IQA); B - Índice de estado trófico (IET)



Fonte: A autora (2020).

Em 2011, os volumes de água dos reservatórios apresentavam-se elevados em relação aos períodos seguintes, de estiagem. Neste ano, o reservatório Camalaú operou com volume variando entre 55,92% e 71,83%, e o Epitácio Pessoa entre 79,64% e 100% da sua capacidade de armazenamento (AESAs, 2021a).

A partir de 2017, pode-se observar uma melhoria nos níveis de qualidade das águas ao longo da área de estudo. Esse período coincidiu com o início da operação do Eixo Leste do PISF, porém mais estudos, com menor intervalo de tempo durante o ano, precisam ser realizados para aprofundar e compreender a relação da contribuição das chegadas das águas do rio São Francisco para melhoria da qualidade da água no Alto Curso do rio Paraíba.

Para o IET foi observado maior percentual das pontos apresentando condição eutrófica (31%). Os pontos variaram em sua parte da condição mesotrófica (22%) a hipereutrófica (19%). Nenhuma estação foi considerada de qualidade ultraoligotrófica.

As classificações de ambientes como ultraoligotrófica e oligotrófica, indicam baixa produtividade primária, correspondendo a águas sem tendência a desenvolver florações de cianobactérias, estando favoráveis ao consumo humano, enquanto, a ocorrência de ambientes considerados eutróficos, supereutróficos e hipereutróficos, indicam que há alta produtividade nas águas, baixa capacidade de autodepuração do corpo hídrico e a necessidade de monitoramento e manejo (CARVALHO et al., 2011).

Tabela 17 – Valores e classificação do IQA e IET no Alto Curso do rio Paraíba, no período de 2011 a 2019.

Ano	Período	Q68				Q69			
		IQA	Nível de qualidade	IET	Classe de estado trófico	IQA	Nível de qualidade	IET	Classe de estado trófico
2011	Chuvoso	71	Boa	66	Supereutrófico	*	*	*	*
	Seco	76	Boa	59	Mesotrófico	*	*	*	*
2012	Chuvoso	49	Regular	62	Eutrófico	*	*	*	*
	Seco	39	Regular	63	Eutrófico	*	*	*	*
2013	Chuvoso	37	Regular	56	Mesotrófico	*	*	*	*
	Seco	44	Regular	56	Mesotrófico	*	*	*	*
2014	Chuvoso	43	Regular	67	Supereutrófico	24	Ruim	80	Hipereutrófico
	Seco	53	Boa	62	Eutrófico	*	*	*	*
2015	Chuvoso	39	Regular	63	Eutrófico	*	*	*	*
	Seco	29	Ruim	77	Hipereutrófico	*	*	*	*
2016	Chuvoso	45	Regular	78	Hipereutrófico	*	*	*	*
	Seco	44	Regular	66	Supereutrófico	*	*	*	*
2017	Chuvoso	69	Boa	63	Eutrófico	66	Boa	64	Supereutrófico
	Seco	66	Boa	62	Eutrófico	60	Boa	63	Supereutrófico
2018	Chuvoso	55	Boa	59	Mesotrófico	*	*	*	*
	Seco	58	Boa	65	Supereutrófico	57	Boa	63	Supereutrófico
2019	Chuvoso	58	Boa	65	Supereutrófico	57	Boa	63	Supereutrófico
	Chuvoso	58	Boa	65	Supereutrófico	57	Boa	63	Supereutrófico
Ano	Período	Q70				Q71			
		IQA	Nível de qualidade	IET	Classe de estado trófico	IQA	Nível de qualidade	IET	Classe de estado trófico
2011	Chuvoso	85	Ótima	48	Oligotrófico	65	Boa	60	Eutrófico
	Seco	88	Ótima	55	Mesotrófico	57	Boa	65	Supereutrófico
2012	Chuvoso	67	Boa	58	Mesotrófico	*	*	*	*
	Seco	75	Boa	51	Oligotrófico	*	*	*	*
2013	Chuvoso	49	Regular	64	Supereutrófico	*	*	*	*
	Seco	55	Boa	61	Eutrófico	*	*	*	*
2014	Chuvoso	50	Regular	67	Supereutrófico	52	Boa	74	Hipereutrófico
	Seco	65	Boa	63	Eutrófico	*	*	*	*
2015	Chuvoso	56	Boa	55	Mesotrófico	44	Regular	78	Hipereutrófico
	Seco	78	Boa	58	Mesotrófico	71	Boa	71	Hipereutrófico
2016	Chuvoso	53	Boa	66	Supereutrófico	45	Regular	71	Hipereutrófico
	Seco	45	Regular	60	Eutrófico	*	*	*	*
2017	Chuvoso	74	Boa	61	Eutrófico	55	Boa	67	Supereutrófico
	Seco	46	Regular	60	Eutrófico	60	Boa	63	Eutrófico
2018	Chuvoso	*	*	*	*	*	*	*	*
	Seco	*	*	*	*	*	*	*	*
2019	Chuvoso	81	Ótima	59	Mesotrófico	56	Boa	62	Eutrófico
Ano	Período	Q72				Q73			
		IQA	Nível de qualidade	IET	Classe de estado trófico	IQA	Nível de qualidade	IET	Classe de estado trófico
2011	Chuvoso	*	*	*	*	75	Boa	58	Mesotrófico
	Seco	*	*	*	*	82	Ótima	56	Mesotrófico
2012	Chuvoso	*	*	*	*	76	Boa	51	Oligotrófico
	Seco	*	*	*	*	72	Boa	52	Oligotrófico
2013	Chuvoso	*	*	*	*	*	*	*	*
	Seco	*	*	*	*	77	Boa	62	Eutrófico
2014	Chuvoso	*	*	*	*	73	Boa	61	Eutrófico
	Seco	*	*	*	*	65	Boa	61	Eutrófico
2015	Chuvoso	28	Ruim	74	Hipereutrófico	72	Boa	56	Mesotrófico
	Seco	*	*	*	*	75	Boa	62	Eutrófico
2016	Chuvoso	*	*	*	*	72	Boa	57	Mesotrófico
	Seco	*	*	*	*	68	Boa	60	Eutrófico
2017	Chuvoso	43	Regular	62	Eutrófico	45	Regular	57	Mesotrófico
	Seco	61	Boa	60	Eutrófico	63	Boa	60	Eutrófico
2018	Chuvoso	*	*	*	*	55	Boa	56	Mesotrófico
	Seco	*	*	*	*	88	Ótima	56	Mesotrófico
2019	Chuvoso	52	Boa	61	Eutrófico	88	Ótima	56	Mesotrófico
Ano	Período	Q74				* Ponto de monitoramento sem água no momento da coleta ou com dados incompletos para execução dos cálculos dos índices.			
		IQA	Nível de qualidade	IET	Classe de estado trófico				
2011	Chuvoso	52	Boa	80	Hipereutrófico	Legenda: Q68 - Reservatório Poções Q69 - Jusante reservatório Poções Q70 - Reservatório Camalaú Q71 - Jusante reservatório Camalaú Q72 - Montante do reservatório Epitácio Pessoa Q73 - Reservatório Epitácio Pessoa Q74 - Jusante do reservatório Epitácio Pessoa			
	Seco	74	Boa	58	Mesotrófico				
2012	Chuvoso	42	Regular	77	Hipereutrófico				
	Seco	39	Regular	64	Supereutrófico				
2013	Chuvoso	31	Ruim	50	Oligotrófico				
	Seco	34	Ruim	52	Oligotrófico				
2014	Chuvoso	31	Ruim	84	Hipereutrófico				
	Seco	41	Regular	83	Hipereutrófico				
2015	Chuvoso	*	*	*	*				
	Seco	42	Regular	81	Hipereutrófico				
2016	Chuvoso	47	Regular	74	Hipereutrófico				
	Seco	*	*	*	*				
2017	Chuvoso	*	*	66	Supereutrófico				
	Seco	*	*	*	*				
2018	Chuvoso	*	*	*	*				
	Seco	*	*	*	*				
2019	Chuvoso	45	Regular	64	Supereutrófico				

Fonte: A autora (2020).

Os períodos mais críticos observados foram de 2013 a 2015 com relação ao IQA, e de 2014 a 2016 para o IET. Dentre os pontos, Q74 se destacou com maior ocorrência de amostras classificadas com nível de qualidade inferior e mais episódios de amostras com nível de trofia entre supereutrófico e hipereutrófico (Figura 37 B e Tabela 17).

Os reservatórios Epitácio Pessoa (Q73) e Camalaú (Q70) apresentaram índices melhores tanto para qualidade da água como para o nível de trofia. Esses resultados podem estar relacionados ao maior volume de água nesses pontos em relação aos demais, mesmo em período de estiagem, com destaque para o Q73. Júnior (2009) também observou a influência da redução do volume de água na oscilação da qualidade da água no reservatório Epitácio Pessoa e em seus trechos a montante e a jusante.

No estudo de Bucci e Oliveira (2014) também foi relatado tendência a melhores condições de qualidade da água e nível de trofia em reservatórios quando comparados aos trechos a jusante e tributários.

A mesma correlação, com volume de água, foi observada em Q74, especialmente nos períodos de extremo climático, quando passou a sofrer os impactos da descarga reduzida de água proveniente do reservatório Epitácio Pessoa.

Além da quantidade disponível de água suficiente para diluir os nutrientes na coluna de água, outros fatores como presença de agricultura irrigada no entorno de reservatórios e os lançamentos de esgoto e efluentes, vêm sendo apontados como umas das principais causas responsáveis por modificar os parâmetros físico-químicos da água (FERREIRA et al., 2019; LEANDRO; ROCHA, 2019; WU et al, 2021).

O açude Epitácio Pessoa não vertia água desde 2011, período no qual exibiu sua última cheia. O reservatório é responsável por garantir a perenidade do rio Paraíba a jusante, mas com o grande período de estiagem na região, a sua vazão ficou comprometida, voltando a verter após a chegada das águas do rio São Francisco em 2017, em períodos pré-determinados pela ANA e AESA.

Souza et al. (2018), observaram em seu estudo, forte relação entre a redução do volume de água disponível, com a elevação negativa do grau de trofia da água em reservatório no semiárido nordestino.

A utilização de índices de qualidade da água tem sido amplamente aplicada em estudos sobre o assunto e relatada como uma ferramenta eficiente para a gestão de recursos hídricos. Apresenta uma análise de dados de fácil interpretação e compreensão das variações dos parâmetros de qualidade da água em um corpo hídrico e, com os resultados obtidos,

categoriza diferentes situações de qualidade da água e seus respectivos métodos de gestão (NOORI et al., 2019; DASH; KALAMDHAD, 2021; UDDIN et al., 2021).

Algumas contradições foram observadas quando comparadas às análises dos dois índices estudados. A área de estudo apresentou águas com qualidade classificada como Boa na maior parte do monitoramento, enquanto o estado trófico predominante foi o eutrófico, portanto apontando estados diferentes da qualidade do corpo hídrico.

Estudando comparativamente o IQA e o IET, Souza et al. (2018) concluíram que não há correlação significativa entre esses índices para um reservatório no semiárido, e que a avaliação isolada do IQA não é indicada para determinar o estado de conservação do reservatório. Os autores destacaram que o IET se mostrou mais eficiente na mensuração da qualidade do corpo hídrico estudado.

Portanto, a aplicação dos índices deve estar associada ao maior número possível de características e análises ambientais, especialmente em regiões tropicais, onde os dados das condições dos reservatórios são normalmente realizados a partir de amostragens esporádicas (ESTEVES, 2011).

4.2.3 Avaliação da comunidade fitoplanctônica

A composição florística da comunidade fitoplanctônica no Alto Curso do rio Paraíba esteve representada por um total de sete divisões ao longo de todo período de monitoramento, distribuídos entre os pontos de amostragem. Estas foram Cyanobacteria (21 táxons), Chlorophyta (36 táxons), Euglenophyta (10 táxons), Dinophyta (05 táxons), Cryptophyta (02 táxons), Bacillariophyta (13 táxons) e Streptophyta (01 táxons) (Tabela 18; Figura 38).

Tabela 18- Riqueza e densidade (célula.mL⁻¹) total dos táxons fitoplanctônicos identificados nos pontos de amostragem localizados no Alto Curso do rio Paraíba, Eixo Leste do PISF, no período de 2011 a 2019. Q68: Reservatório Poções, Q69: Jusante do reservatório Poções, Q70: Reservatório Camalaú, Q71: Jusante do reservatório Camalaú, Q72: Montante do reservatório Epitácio Pessoa, Q73: Reservatório Epitácio Pessoa e Q74: Jusante do reservatório Epitácio Pessoa

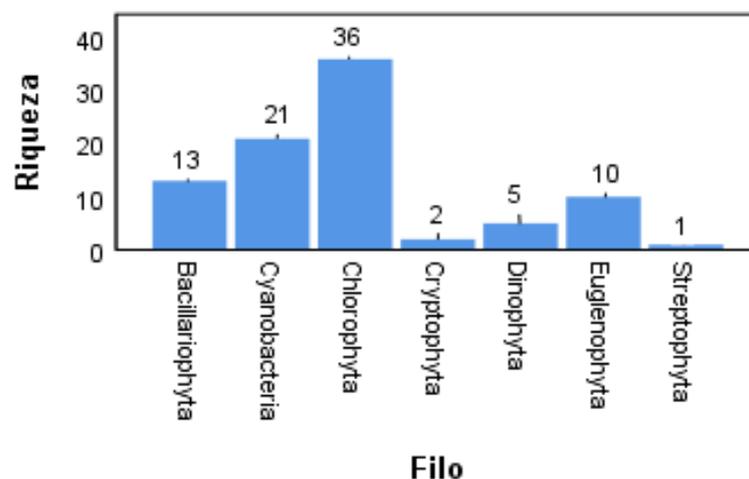
Táxons	Q68	Q69	Q70	Q71	Q72	Q73	Q74
Cyanobacteria							
<i>Anabaenopsis circularis</i>	972						
<i>Aphanizomenon gracile</i>		1213					
<i>Aphanocapsa delicatissima</i>							1746
<i>Asterocapsa</i> sp.	943		660				
<i>Chroococcus dispersus</i>	26	32663					
<i>Chroococcus</i> sp.	1207						13906
<i>Coelosphaerium</i> sp.						166	
<i>Dolichospermum planctonica</i>	16890	472	2889	116			1595

<i>Dolichospermum spiroides</i>							1438
<i>Geitlerinema</i> sp.							1676
<i>Merismopedia punctata</i>	1453			11963	125	2223	347
<i>Merismopedia tenuissima</i>	795			1129		3541	
<i>Microcystis</i> sp.	2813		1594				
<i>Oscillatoria</i> sp.	287677	3109	653	547		10156	27860
<i>Phormidium</i> sp.						284	
<i>Planktothrix agardhii</i>	35556	18885	541			5246	
<i>Psudanabaena limnetica</i>			844			3049	1781
<i>Pseudanabaena</i> sp.	3094						925
<i>Raphidiopsis philippinensis</i>		6033					
<i>Raphidiopsis raciborskii</i>	135776	3329	35783	313		49249	625
<i>Sphaerospermopsis torques-reginae</i>	2192	32663	660				227
Subtotal	489394	98367	43624	14068	125	73914	52126
Chlorophyta							
<i>Acanthosphaera</i> sp.							234
<i>Actinastrum</i> sp.	31						3521
<i>Closterium</i> sp.	116		39				8179
<i>Cosmarium</i> sp.	16		326			39	1227
<i>Crucigeria tetrapedia</i>	226		143				
<i>Crucigenia</i> sp.						0	1536
<i>Crucigeniella</i> sp.		503					
<i>Desmodesmus communis</i>		197	66				908
<i>Desmodesmus obliquos</i>	4						8
<i>Desmodesmus</i> sp.	226						
<i>Fusola viridis</i>	278					164	
<i>Keratococcus suecicus</i>						33	95
<i>Lagerheimia</i> sp.						33	
<i>Merismopedia</i> sp.		0					
<i>Monoraphidium arcuatum</i>	227	66	16	16	16		
<i>Monoraphidium caribeum</i>	141						416
<i>Monoraphidium contortum</i>	543	33	107	16		544	341
<i>Monoraphidium convolutum</i>	94						
<i>Monoraphidium griffithii</i>						164	
<i>Monoraphidium</i> sp.	99		315			19	9234
<i>Oocystis lacustris</i>	2		0				514
<i>Oocystis</i> sp.			16				214
<i>Pediastrum tetras</i>			19				31
<i>Pediastrum</i> sp.							636
<i>Scenedesmus acuminatus</i>							1734
<i>Scenedesmus bijugus</i>	220						
<i>Scenedesmus circumfusus</i>							63
<i>Scenedesmus denticulatus</i>							578
<i>Scenedesmus quadricauda</i>		0					1300
<i>Scenedesmus</i> sp.							170
<i>Staurastrum tetras</i>							76
<i>Staurastrum</i> sp.							94
<i>Tetraedron trigonum</i>	33	33	16			33	
<i>Tetraedron</i> sp.							124
<i>Tetrastrum minimum</i>	75						
<i>Tetrastrum triangulare</i>	528	503					
Subtotal	2858	1335	1063	32	16	1029	31233

Euglenophyta							
<i>Euglena acus</i>						135	
<i>Euglena gracilis</i>	36						
<i>Euglena proxima</i>						266	
<i>Euglena</i> sp.	2						
<i>Phacus</i> sp.	139						
<i>Strombomonas verrucosa</i>						33	
<i>Strombomonas</i> sp.	62					16	
<i>Trachelomonas hispida</i>	1						
<i>Trachelomonas volvocina</i>	4		180			33	13
<i>Trachelomonas</i> sp.	57			110	156	19	2249
Subtotal	301	0	180	544	172	52	2262
Dinophyta							
<i>Ceratium furcoides</i>			75			98	
<i>Ceratium hirundinella</i>			25				
<i>Gymnodinium</i> sp.	78			184			9420
<i>Peridinium umbonatum</i>						66	
<i>Peridinium</i> sp.	152	377					51
Subtotal	230	377	100	184	0	164	9471
Cryptophyta							
<i>Cryptomonas marssonii</i>		33					
<i>Cryptomonas</i> sp.	1.706	33	115	406		672	1.400
Subtotal	1.706	66	115	406	0	672	1.400
Bacillariophyta							
<i>Aulacoseira granulata</i>	1.307	628			47	0	75
<i>Cyclotella stelligera</i>	261		36	55		38	753
<i>Cyclotella</i> sp.				16			860
<i>Fragilaria crotonensis</i>						393	
<i>Gyrosigma</i> sp.		2.513					
<i>Gomphonema</i> sp.				16			
<i>Navicula</i> sp.	2		16				116
<i>Nitzschia reversa</i>		66					
<i>Nitzschia</i> sp.	16						
<i>Synedra ulna</i>							58
<i>Surirella</i> sp.	1						
<i>Tabellaria</i> sp.							25
<i>Ulnaria ulna</i>	36	5.151				33	
Subtotal	1.623	8.358	52	87	47	464	1.887
Streptophyta							
<i>Gonatozygon aculeatum</i>	1836						
Subtotal	1836	0	0	0	0	0	0
TOTAL	497948	108503	45134	15321	360	76295	98379

Fonte: A autora (2020).

Figura 38 - Riqueza da comunidade fitoplantônica no Alto Curso do rio Paraíba, no período de 2011 a 2019



Fonte: A autora (2020).

Dentre os táxons encontrados, Chlorophyta se destacou com maior riqueza de espécies, com exceção do ponto Q71 (jusante do reservatório Camalaú), apresentando 31% para Cyanobacteria, seguida pelas Euglenophyta (21%) (Figura 39). Já nos pontos a jusante do reservatório Poções (Q69), e a montante do reservatório Epitácio Pessoa (Q72) as Chlorophyta dividiram espaço com as Cyanobacteria e Euglenophyta, respectivamente. Os pontos citados acima têm em comum uma característica primordial, são trechos lóticos e intermitentes da bacia (BARBOSA et al., 2021).

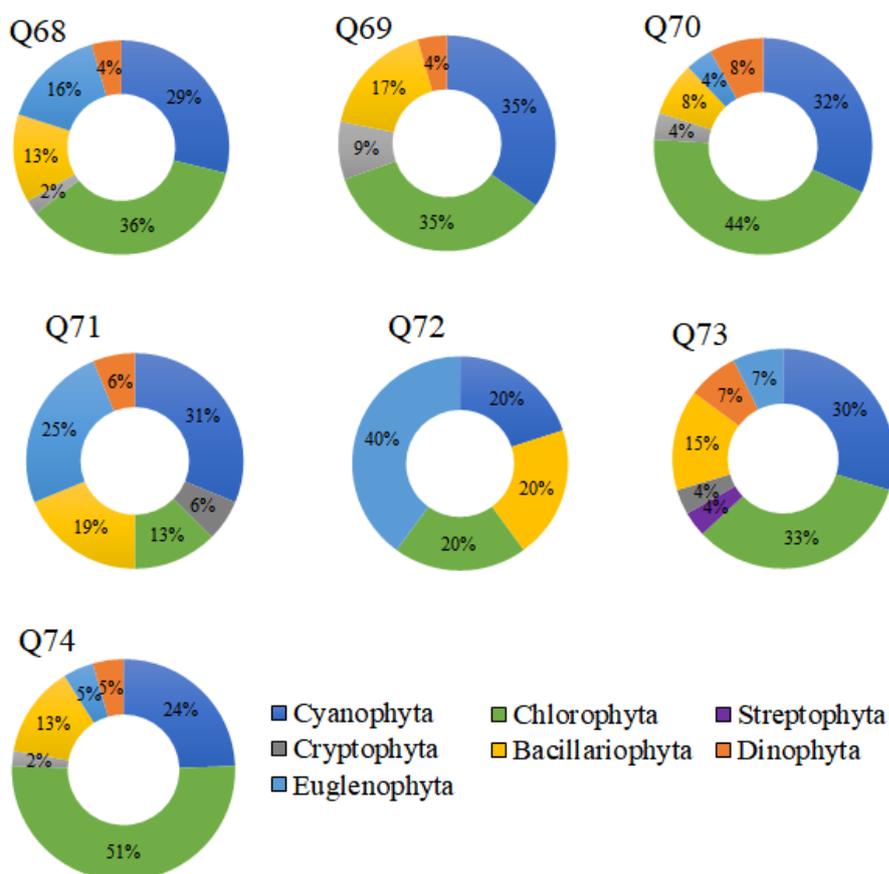
A redução do volume de água em determinados períodos, associado à altas temperaturas da água, aporte de fósforo, águas neutro-alcálinas (pH de 6,0 a 9,0), podem estar relacionadas a maior riqueza de Cyanobacteria nesses trechos (CRUZ et al., 2017; SILVA et al., 2020). A análise do monitoramento da qualidade da água aponta os pontos Q71 e Q72, como um dos que apresentaram concentrações mais elevadas do fósforo total e temperatura da água (Figuras 28 D e Figura 34 A).

Cyanobacteria são organismos que conseguem se adaptar facilmente às condições adversas no ambiente, como diminuição do volume hídrico nos corpos hídricos e águas eutrofizadas. Em contrapartida, as Chlorophyta são encontradas em maior número em corpos hídricos tropicais e oligotróficos, mas sendo consideradas cosmopolitas. Por isso, ambos os grupos são considerados bioindicadores da qualidade da água, Cyanobacteria contendo várias espécies bioindicadoras de águas eutrofizadas e Chlorophyta, com vários representantes de águas de boa qualidade (CARDOSO et al., 2017a).

Vários trabalhos reportam a predominância da riqueza de Chlorophyta e Cyanobacteria em bacias hidrográficas no Nordeste brasileiro (MOLISANI et al. 2010; NASCIMENTO, 2010;

ARAGÃO-TAVARES et al., 2015; RAMOS et al., 2016; CARDOSO et al., 2017a; CRUZ et al., 2017; CARDOSO et al., 2019; OLIVEIRA et al., 2019).

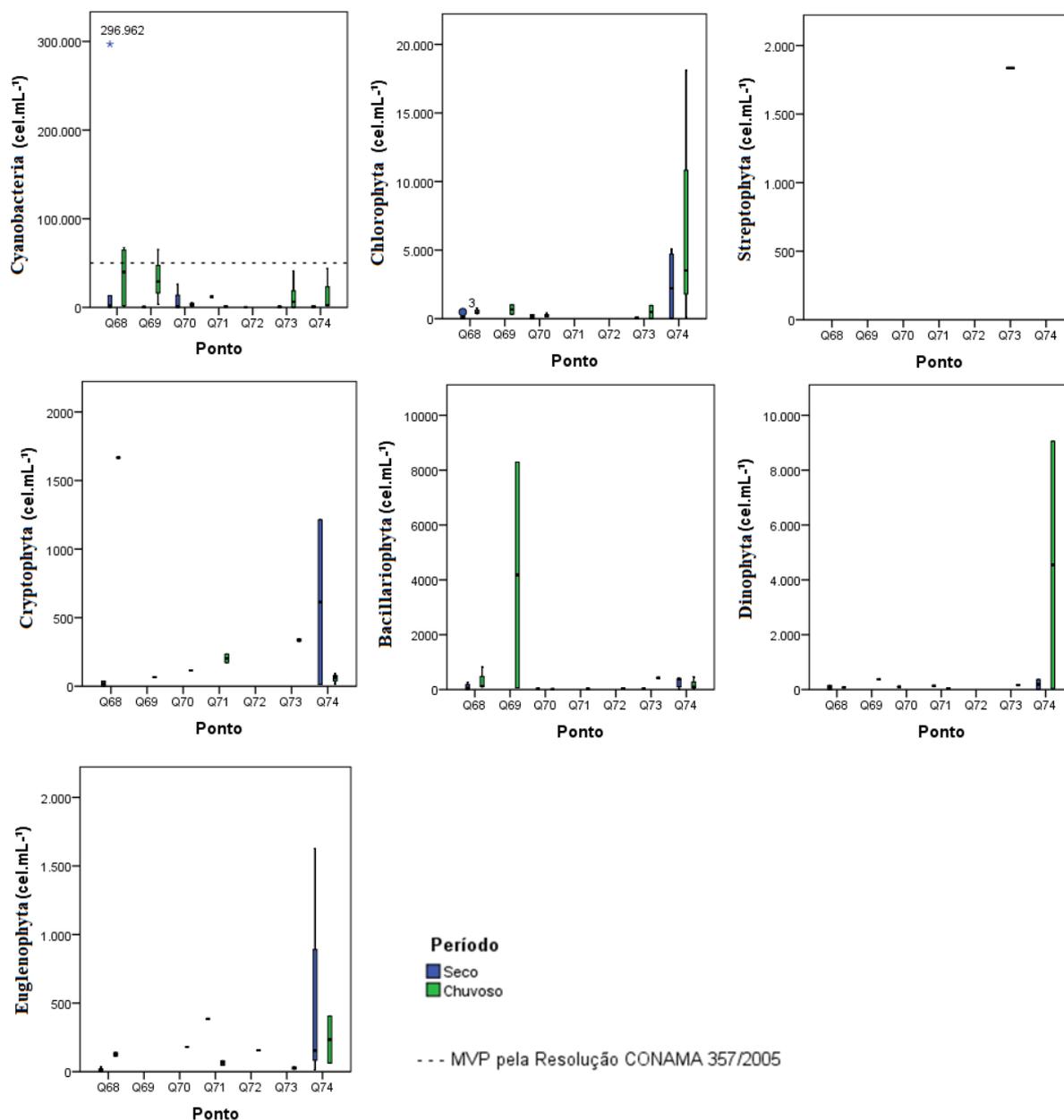
Figura 39 – Riqueza da comunidade fitoplanctônica nos pontos de amostragem localizados no Alto Curso do rio Paraíba, no período de 2011 a 2019. Q68: Reservatório Poções, Q69: Jusante do reservatório Poções, Q70: Reservatório Camalaú, Q71: Jusante do reservatório Camalaú, Q72: Montante do reservatório Epitácio Pessoa, Q73: Reservatório Epitácio Pessoa e Q74: Jusante do reservatório Epitácio Pessoa



Fonte: A autora (2020).

Com relação à densidade da comunidade fitoplanctônica foi observado que as Cyanobacteria foram mais representativas em todos os pontos de amostragem, com exceção do Q72 (montante do reservatório Epitácio Pessoa), com maior densidade das Euglenophyta (Figura 40). Este trecho é caracterizado por possuir pouca profundidade e a expressividade de algumas espécies de Euglenophyta está relacionada à baixa transparência da água e altas concentrações de nitrogênio e fósforo, que podem ser consequências da ressuspensão do sedimento em águas rasas, elevando a turbidez e concentrando nutrientes na coluna de água (CRUZ et al., 2018).

Figura 40 - Densidade (célula.mL⁻¹) da comunidade fitoplanctônica, nos períodos seco e chuvoso, no Alto Curso do rio Paraíba, no período de 2011 a 2019



Fonte: A autora (2020).

As densidades das cianobactérias variaram de 296.962 célula.mL⁻¹, em Q68 (reservatório Poções) no ano de 2012 (período seco), à 32 célula.mL⁻¹, em Q71 (jusante do reservatório Camalaú), no ano de 2015 (período seco). Chlorophyta foi o segundo grupo registrando as maiores densidades.

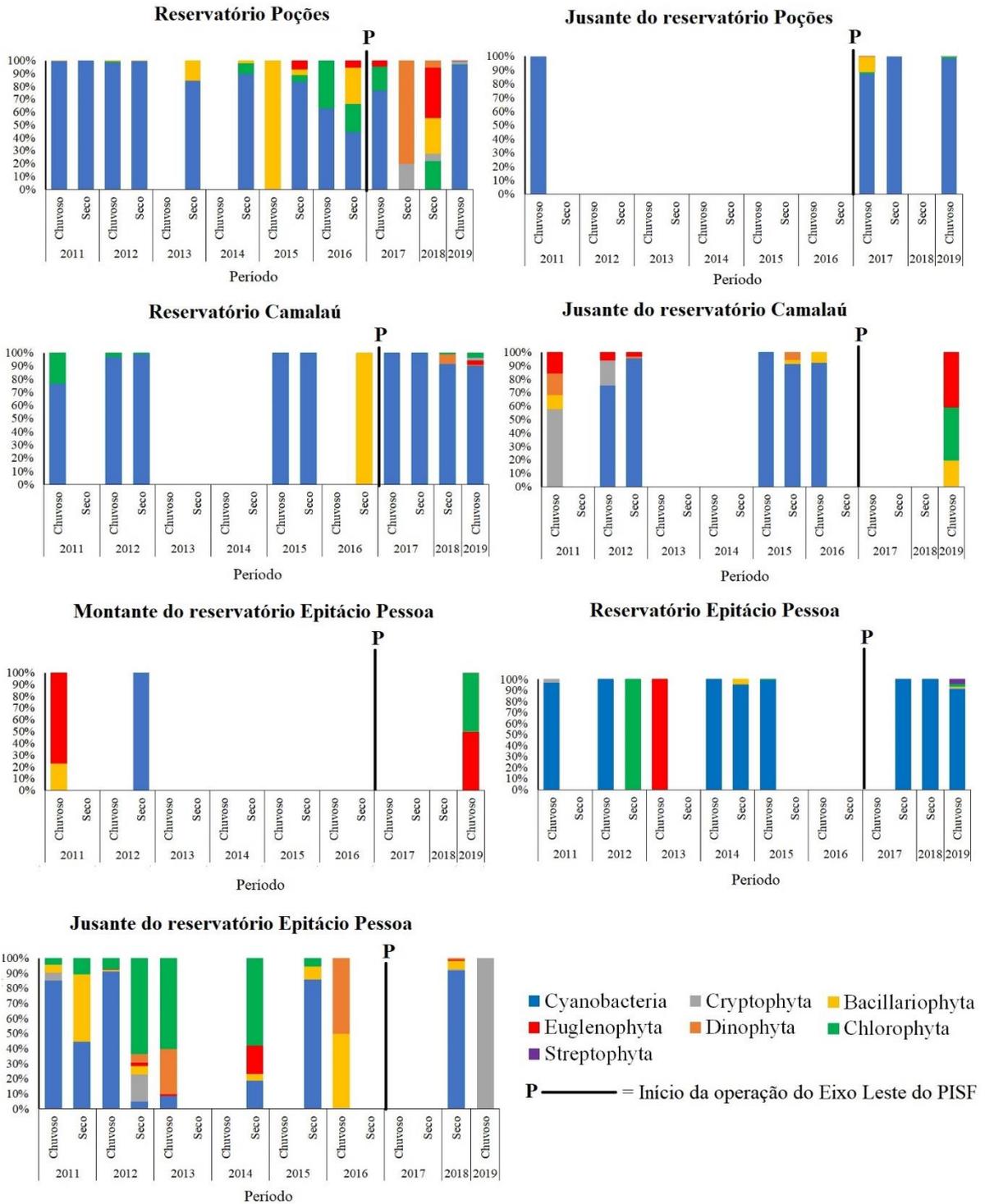
Em geral, na comunidade fitoplanctônica, o desenvolvimento de florações é causado por diversos fatores abióticos, como baixa transparência da água, elevadas temperaturas, alta disponibilidade de nutrientes na água e o pH (TUNDISI; MATSUMURA-TUNDISI, 2008;

CRUZ et al., 2017). As altas densidades de Cyanobacteria estão comumente associadas às condições térmicas, pois possuem potencial adaptativo a altas temperaturas e baixa luminosidade, sendo bastante persistentes as mudanças climáticas. Já as clorófitas têm forte relação com a desestratificação da coluna de água e disponibilidade de nutrientes provenientes da ressuspensão do sedimento (CRUZ et al., 2017; CRUZ et al., 2018; SILVA et al., 2020).

Padrão semelhante pode ser observado para abundância relativa, com as Cyanobacteria dominando o ambiente sazonalmente e especialmente, sobretudo nos reservatórios Poções (Q68), Camalaú (Q70) e Epitácio Pessoa (Q73) (Figura 41). Os primeiros registros de florações de cianobactérias na Paraíba foram reportados no Parque Solón de Lucena (BARBOSA et al., 2001), uma lagoa natural urbana localizada na capital. Dos reservatórios destinados ao abastecimento, os primeiros registros de cianobactérias ocorreram no reservatório Acauã, na região do Médio Curso do rio Paraíba, apresentando florações de *Microcystis aeruginosa* (Kützing) Kützing, 1846 e *Raphidiopsis raciborskii* (Woloszynska) Aguilera & al. 2018 (BARBOSA; WATANABE, 2000; MENDES; BARBOSA, 2004).

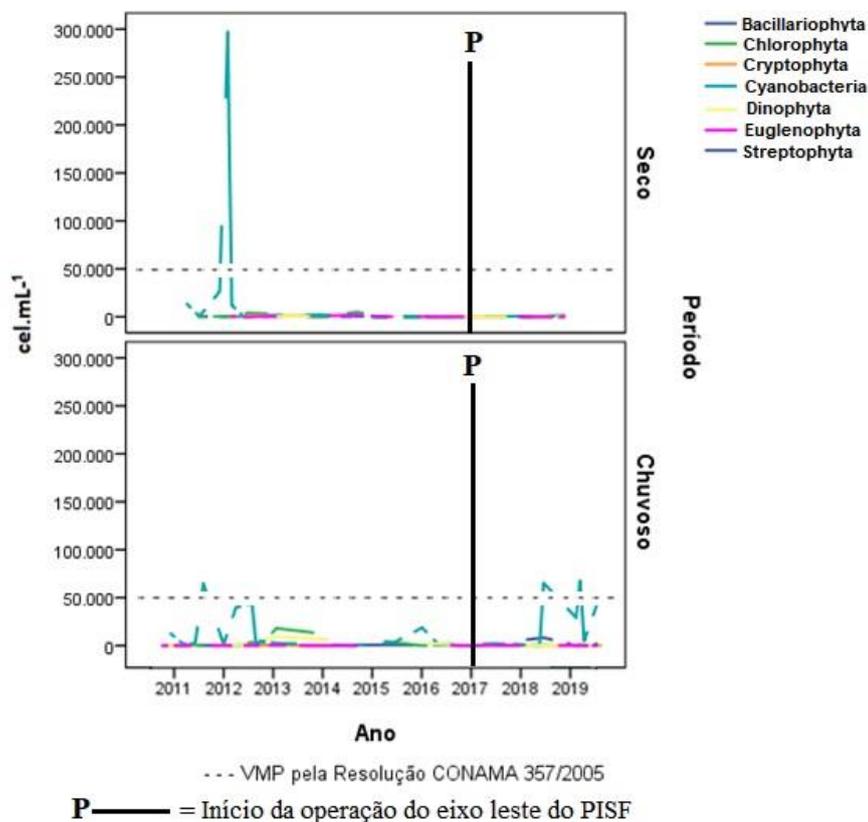
Quando comparados os períodos seco e chuvoso, foi possível observar que as densidades mais elevadas, sobretudo das cianobactérias, ocorreram na sua maioria durante o período considerado chuvoso, exceto no ponto Q68 (reservatório Poções) em 2012 (Figura 40 e Figura 42). No entanto, devemos considerar que entre os anos de 2012 e 2016, ocorreu um longo período de estiagem no semiárido, que atingiu a região de estudo, ocorrendo nos trechos lóticos insuficiência de água, e nos trechos lânticos, os reservatórios chegaram ao colapso hídrico (AESAs, 2020).

Figura 41 – Abundância relativa da comunidade fitoplancônica no Alto Curso do rio Paraíba, Eixo Leste do PISF, no período de 2011 a 2019



Fonte: A autora (2020).

Figura 42 – Densidade total (célula.mL⁻¹) da comunidade fitoplânctônica nos pontos de amostragem no Alto Curso do rio Paraíba, no período de 2011 a 2019



Fonte: A autora (2020).

Em relação aos padrões de qualidade da água, para enquadramento dos corpos hídricos e para potabilidade, utilizou-se para comparação a Resolução Conama 357/05 e a Portaria de Consolidação nº 5/2017 do Ministério da Saúde (MS), respectivamente (BRASIL, 2005; 2017).

Durante o período de monitoramento foram observados valores de densidades acima dos limites recomendado por ambas as legislações brasileiras. Estas densidades ultrapassaram o limite máximo de 50.000 célula.mL⁻¹ preconizado pela Resolução Conama 357/05, para águas de classe 2 (BRASIL, 2005), nos anos de 2011 (em Q68 com 64.828 célula.mL⁻¹ no período chuvoso), 2012 (Q68 com 296.962 célula.mL⁻¹ no período seco), 2017 (em Q69, com 65.326 célula.mL⁻¹ no período chuvoso) e em 2019 (Q68, com 67.501 célula.mL⁻¹). Os pontos localizados a jusante do reservatório Camalaú (Q71) e a montante do reservatório Epitácio Pessoa (Q72) não apresentaram densidades acima do limite permitido pela legislação.

Quando os resultados do último ano monitorado (2019) são comparados à Portaria de Consolidação nº 5/2017 do Ministério da Saúde (MS), que estabelece frequência de monitoramento semanal caso a densidade de cianobactérias exceda 10.000 célula.mL⁻¹,

observa-se que o reservatório Poções (Q68), a jusante dele (Q69) e o reservatório Epitácio Pessoa (Q73) se enquadram nessa exigência (BRASIL, 2017).

Foram identificadas espécies de Cyanobacteria potencialmente produtoras de cianotoxinas, e estas vêm sendo relatadas em reservatórios no semiárido nordestino (RAMOS et al., 2016; CARDOSO et al., 2017a; SILVA et al., 2019; SILVA et al., 2020). Entre os organismos identificados, a *Raphidiopsis raciborskii* (no reservatório Poções (Q68) em 2011, 2012 e 2019, no reservatório Camalaú (Q70) em 2012 e Q73 em 2019), a *Oscillatoria* sp. (no reservatório Poções (Q68) em 2011 e 2012 e a jusante do reservatório Epitácio Pessoa (Q74) em 2012) e a *Sphaerospermopsis torques-reginae* (a jusante do reservatório Poções (Q69) em 2017), registraram ocorrência com valores acima do recomendado pela legislação brasileira.

Apesar das baixas densidades observadas para outros táxons potencialmente produtores de cianotoxinas, como a *Aphanocapsa delicatissima*, *Chroococcus* sp., *Dolichospermum planctonicum*, *Microcystis* sp., *Geitlerinema* sp., *Planktothrix agardhii*, *Pseudanabaena* sp. e *Pseudanabaena limnetica* (SANT'ANNA et al., 2006; RAMOS et al., 2016), a ocorrência delas chama atenção para necessidade contínua de monitoramento das cianobactérias, assim como das cianotoxinas na água, sobretudo por se tratar de águas destinadas ao abastecimento público (Q68, Q70 e Q73). Pois, a maior parte das cianotoxinas não são removidas pelo tratamento convencional da água comumente utilizado nas estações brasileiras, fazendo com que a água potável seja potencial fonte de exposição do homem às cianotoxinas (CRUZ et al., 2017).

Para estes casos, a Portaria de Consolidação nº 5/2017 do MS, incube ao operador do sistema de abastecimento realizar análise semanal de cianotoxinas no ponto de captação de água no manancial (BRASIL, 2017).

O monitoramento das cianobactérias e cianotoxinas é de extrema importância ambiental, como bioindicadoras de águas eutrofizadas, bem como sanitária, pois já foram registradas ocorrências de florações tóxicas em corpos hídricos no Nordeste brasileiro que ocasionaram danos à saúde pública. Como o ocorrido em 1988, no reservatório Itaparica (PE-BA), levando 86 pessoas a óbito por gastroenterite pelo consumo de água com floração de cianobactérias tóxicas, e em 1996, quando 76 pacientes renais submetidos à hemodiálise numa clínica no município de Caruaru (PE) foram a óbito após contato com cianotoxinas através da água de abastecimento (CARDOSO et al., 2017a).

Na Paraíba, Silva et al. (2020), detectaram pela primeira vez a cianotoxina cilindrospermopsina no reservatório Camalaú, sendo o primeiro registro em reservatórios no estado. Anteriormente, a maior parte dos relatos de ocorrência era em reservatórios de Pernambuco. Os autores chamam atenção para ocorrência de outros metabólitos bioativos,

como a saxitoxina no reservatório Poções, mas sem registro de espécies conhecidas como potencialmente produtoras desta toxina, sugerindo que outras espécies ainda não identificadas podem estar produzindo este metabólito e que apenas o uso da identificação de potenciais espécies produtoras de cianotoxinas como um indicador de presença destes bioativos pode estar sendo ineficaz.

Em relação à chegada das águas do rio São Francisco a bacia do rio Paraíba, em 2017, pode-se observar que, mesmo com o aumento do aporte de água no Alto Curso do rio Paraíba, as Cyanobacteria foram mais expressivas, dominando esses ambientes. Além disso, apresentou valores acima do limite recomendado pela Resolução Conama 357/05 (BRASIL, 2005) em dois pontos: no reservatório Poções (Q68), com $67.501 \text{ célula.mL}^{-1}$ em 2019; e, a jusante dele (Q69), com $65.362 \text{ célula.mL}^{-1}$ em 2017 (período chuvoso). De acordo com Barbosa et al. (2021), sugere-se que com a chegada das águas do PISF tenha ocorrido ressuspensão do sedimento disponibilizando na água maiores concentrações de nutrientes e aumento da turbidez. Por isso, grupos como o das Cyanobacteria, que possuem alta adaptabilidade a ambientais diversos, conseguem se sobressair na comunidade fitoplanctônica.

Após o início da operação do PISF, foram identificadas duas espécies de dinoflagelados, consideradas exóticas, que anteriormente não havia sido identificada neste monitoramento, as espécies *Ceratium furcoides* (Levander) Langhans 1925, observada nos reservatórios Camalaú, em 2018 ($75 \text{ célula.mL}^{-1}$) e Epitácio Pessoa, em 2019 ($98 \text{ célula.mL}^{-1}$), e *Ceratium hirundinella* (O.F.Müller) Dujardin 1841, no reservatório Camalaú, em 2018 ($25 \text{ célula.mL}^{-1}$).

Representantes do gênero *Ceratium* sp. são considerados invasores em corpos de águas doces da América do Sul e são predominantemente encontrados em ambientes marinhos, tendo sido também reportado pela primeira vez no Alto Curso do rio Paraíba 40 dias após o início de operação do PISF (MENDES et al., 2018). Os autores não descartam como causa da dispersão dessas espécies de dinoflagelados na área de estudo outros fatores como o vento, zoocoria e como uma consequência dos monitoramentos da qualidade da água que são realizados nos reservatórios na região.

Gomes et al. (2021), relatam que o episódio ocorrido em abril de 2015, quando foi registrada ocorrência de uma “mancha negra” no rio São Francisco, na área de abrangência do reservatório de Xingó, formada por floração da espécie exótica *C. furcoides*, no entanto, esta espécie já havia sido identificada anos antes nos reservatórios do Submédio e Baixo São Francisco e nos rios Moxotó e Contas.

Destaca-se que são necessários estudos complementares nos próximos anos para observar as flutuações na comunidade fitoplanctônica, os efeitos da introdução de espécies

exóticas, os impactos provenientes das mudanças climáticas e temperatura da água e ocorrendo melhorias na qualidade da água do rio Paraíba, quais impactos interferiram na dinâmica do fitoplâncton no corpo hídrico estudado. Sobretudo, por apresentar altas densidades de cianobactérias, indicando risco à qualidade da água com liberação de compostos de propriedades organolépticas que conferem gosto e odor às águas (RAMOS et al., 2016), e risco à saúde pública, pela ocorrência de espécies potencialmente produtoras de cianotoxinas em reservatórios de abastecimento humano.

O desenvolvimento do fitoplâncton está atrelado a diversos fatores ambientais, entre eles as condições físico-químicas da água (WIEGAND et al., 2016). Com a eutrofização das águas, ocasionando o aumento da concentração de alguns nutrientes, como o fósforo e o nitrogênio, alguns grupos do fitoplâncton são mais propícios a dominar o ambiente (DI BERNARDO et al., 2010; BITTENCOURT-OLIVEIRA, 2014; CARDOSO et al., 2017a). Por isso é importante a realização do monitoramento físico-químico atrelado ao biológico, a fim de buscar respostas mais contundentes sobre os fatores que estão sendo cruciais para o aumento da eutrofização nos corpos hídricos.

Com base no exposto acima, foi realizada a Análise de Correspondência Canônica (ACC), com objetivo correlacionar as variáveis físico-químicas e a comunidade fitoplanctônica para verificar quais os parâmetros estão influenciando mais significativamente a dominância de alguns grupos. A Tabela 19 mostrou que o Eixo 1 e o Eixo 2 da ACC tiveram autovalores de 0,522 e 0,045, respectivamente.

Tabela 19 - Resumo estatístico e coeficientes de correlação entre as comunidades fitoplanctônicas e as variáveis ambientais dos dois primeiros eixos da ACC

Parâmetros	Eixo 1	Eixo 2
Autovalores	0,522	0,045
Correlação fitoplâncton-ambiente	0,649	0,498
Porcentagem acumulada da variação dos fatores abióticos	40,5%	44,0%
Porcentagem acumulada da variação da relação fitoplâncton-ambiente	83,2%	90,3%
p-value (teste de Monte Carlo do eixo canônico 1)	0,001	
p-value (teste de Monte Carlo de todos os eixos canônicos)	0,001	
OD	-0,0907	0,6728
pH	0,0283	0,0059
DBO	-0,7542	-0,3538
NT	-0,2146	-0,2838
PT	-0,7032	0,2813
Turb	-0,1035	-0,3932

STD

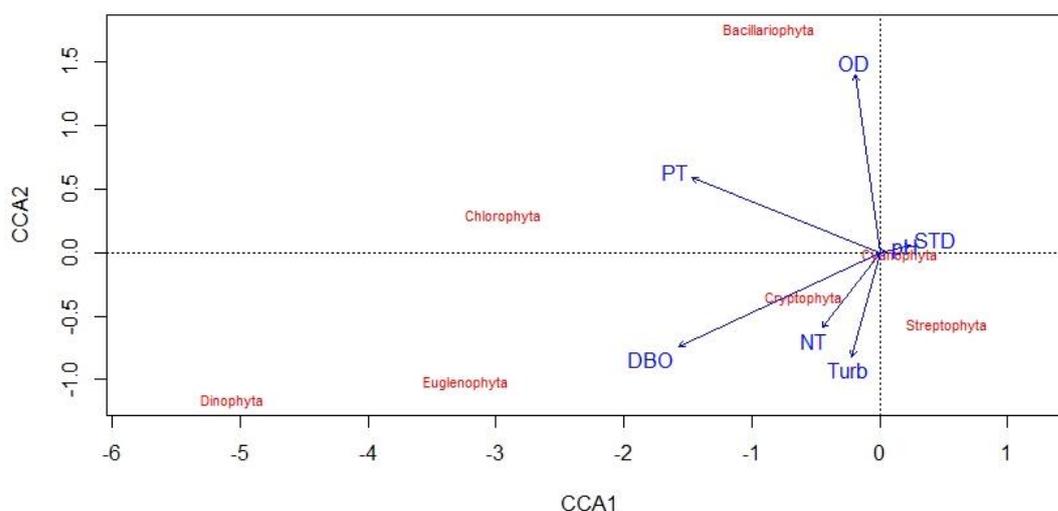
0,1165 0,0285

Fonte: A autora (2020).

A taxa de explicação biaxial da ACC para as mudanças nos fatores abióticos (físico-químicos) atingiu 44,0%, e explicou um total de 90,3% da relação entre o fitoplâncton e as variáveis ambientais. Esses resultados indicaram que os Eixos 1 e 2 refletiram bem a relação entre os dois grupos de dados, e que o uso das duas matrizes para realizar a ACC e a ordenação foi eficaz. Além disso, os coeficientes de correlação entre o fitoplâncton e os dados físico-químicos foram de 0,649 e 0,498 para os eixos 1 e 2, respectivamente, refletindo ainda mais a relação entre as partes. Os parâmetros físico-químicos em áreas representadas pelo eixo 1 e por todos os eixos canônicos foram ambos significativamente correlacionados com a comunidade fitoplanctônica ($p < 0,01$).

Os biplots da ACC (Figura 43) mostram que os ângulos entre as Cryptophyta e as variáveis Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e Nitrogênio Total (NT) são pequenos, indicando uma correlação positiva clara entre esses fatores. A DBO também apresentou correlação positiva com Euglenophyta e Dinophyta. Chlorophyta demonstrou correlação positiva significativa com o Fósforo Total (PT), enquanto o grupo Bacillariophyta se correlacionou significativamente com o Oxigênio Dissolvido (OD). O pH e os Sólidos Dissolvidos Totais (SDT) apresentaram correlação positiva direta com Cyanobacteria e Streptophyta.

Figura 43 - Diagrama de ordenação da ACC entre as comunidades fitoplanctônicas e as variáveis ambientais nos pontos monitorados, no período de 2011 a 2019



Fonte: A autora (2020).

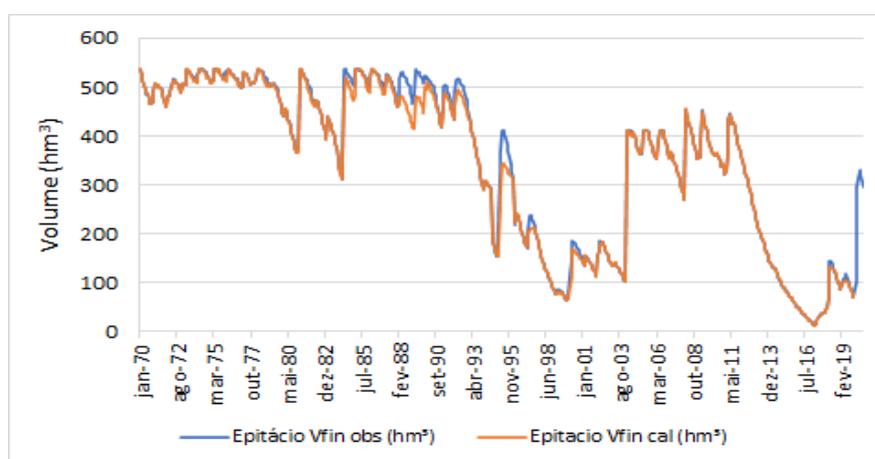
4.3 CENÁRIOS DE ATENDIMENTO ÀS DEMANDAS OUTORGADAS NO ALTO CURSO DO RIO PARAÍBA

4.3.1 Calibração das vazões do sistema

Devido à descontinuidade da série histórica de vazões nos postos fluviométricos existentes na bacia, foi necessário fazer o preenchimento de falhas de vazões no período de análise de alguns postos. O AcquaNet foi configurado para representar os volumes do reservatório Epitácio Pessoa e estimar as vazões afluentes para equilibrar o balanço hídrico.

Os volumes observados no reservatório Epitácio Pessoa e os calculados com o balanço hídrico na rede de fluxo com o AcquaNet, no período de estudo são apresentados na Figura 44. Pode-se observar que a diferença entre os valores é muito pequena. O viés relativo (razão entre o erro médio dos valores observados e simulados, e o volume médio observado) foi de - 1,7%, mostrando uma diferença insignificante entre os valores.

Figura 44 - Volume final (Vfin) no reservatório Epitácio Pessoa, observado (obs) e calculado (cal) no AcquaNet, no período de janeiro de 1970 a dezembro de 2019

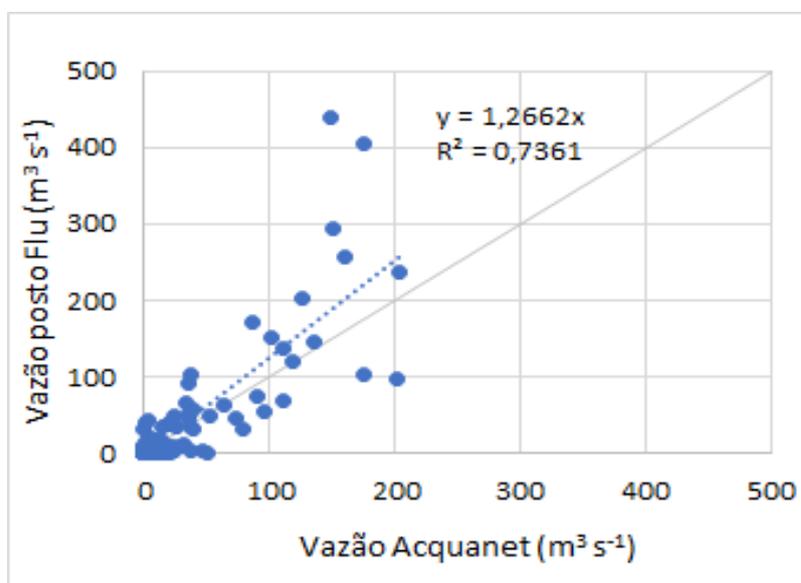


Fonte: A autora (2021).

As vazões efluentes estimadas, obtidas no posto Bodocongó, apresentaram um ajuste satisfatório entre as vazões no referido posto ($R^2 = 0,736$), com uma subestimativa média das vazões calculadas de aproximadamente 27% (Figura 45). Com base nestes resultados, considerou-se válido o método adotado na estimativa das vazões naturais intermediárias do sistema. Admitiram-se prioridades máximas para atendimento das demandas e os volumes

metas observados. As vazões descarregadas nos reservatórios foram calculadas no AcquaNet e as vazões afluentes a eles foram estimadas por meio de balanço hídrico.

Figura 45 - Regressão linear das vazões observadas e calculados no AcquaNet no posto fluviométrico Bodocongó, no período de janeiro de 1970 a dezembro de 2019



Fonte: A autora (2021).

4.3.2 Análise dos cenários de alocação de água

A análise da alocação de água no Alto Curso do rio Paraíba ocorreu por meio da simulação dos principais usos outorgados da água nos reservatórios Poções e Eptácio Pessoa. As demandas de água outorgadas identificadas foram para abastecimento público e irrigação.

A demanda intitulada PISF também se refere ao abastecimento público, sendo destacada por ser uma nova demanda na bacia. Apesar, da maior quantidade de outorgas emitidas para irrigação, as vazões outorgadas para o abastecimento público corresponderam a 67%. Mas, com o crescente aumento de área irrigada no Brasil, intensificou-se a ampliação do debate sobre o uso sustentável da água para esta finalidade e os Sistemas de Suporte à Decisão voltados à gestão dos recursos hídricos, vêm se consolidando como ferramenta eficaz para assessoria nos processos de alocação de água (CARVALHO et al., 2020; ANJOS et al., 2022).

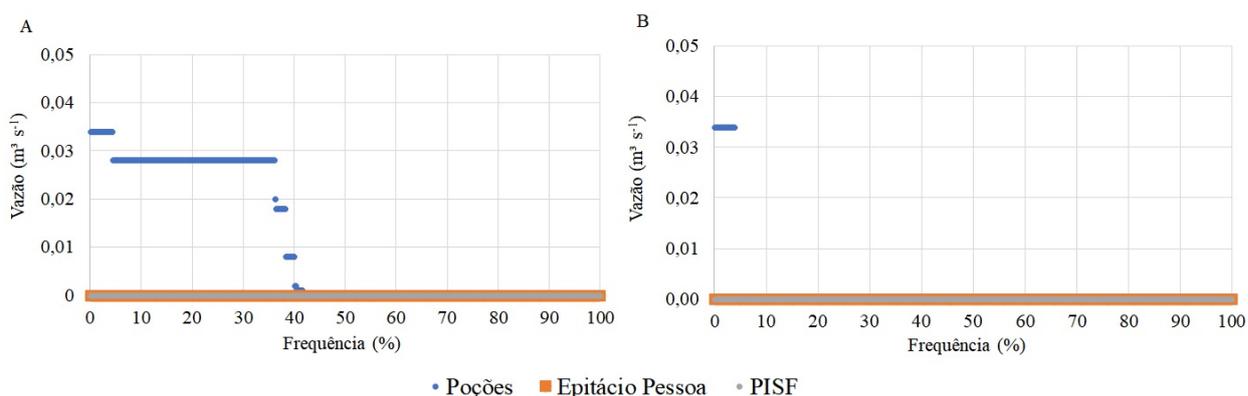
Os cenários estudados correspondem ao cenário 1 – sem presença das águas do PISF e cenário 2 – com presença das águas do PISF, simulados para o período de 1970 a 2019, e os cenário 3 – com vazão real aplicada ao PISF e cenário 4 – considerando vazão de $10 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, no período de 2017 a 2019.

4.3.2.1 Cenários: 1 – com PISF e 2 – sem PISF

Foi possível observar que, a partir da entrada de águas do PISF no reservatório Poções, houve aumento no percentual de atendimento ao abastecimento público. O déficit de atendimento diminuiu de 42% no cenário 1, sem águas do projeto, para 4% no cenário 2, com águas do PISF (Figura 46). O cenário 2, apresentou 1 ano e 11 meses de falha no atendimento e a vazão em déficit foi equivalente ao total da demanda requerida ($0,034 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) nesse período. No cenário 1, o período de déficit variou durante 41 anos, observando anos com déficit de apenas em 1 mês e anos com déficit durante os 12 meses. Somando-se os meses com déficits sequenciais, observa-se um total de 20 anos e 8 meses de falha no atendimento.

As demandas para abastecimento público, aplicadas nos cenários 1 e 2, foram de $0,034 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ no reservatório Poções, $0,266 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ no reservatório Epitácio Pessoa e $1,17 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ para o PISF.

Figura 46 - Curva de permanência do déficit de atendimento para abastecimento público nos reservatórios Poções e Epitácio Pessoa e PISF (SIAA - Campina Grande e Cariri), simulado no período de 1970 a 2019: A: Cenário 1 - sem influência das águas do PISF e B: Cenário 2 - com presença das águas do PISF



Fonte: A autora (2021).

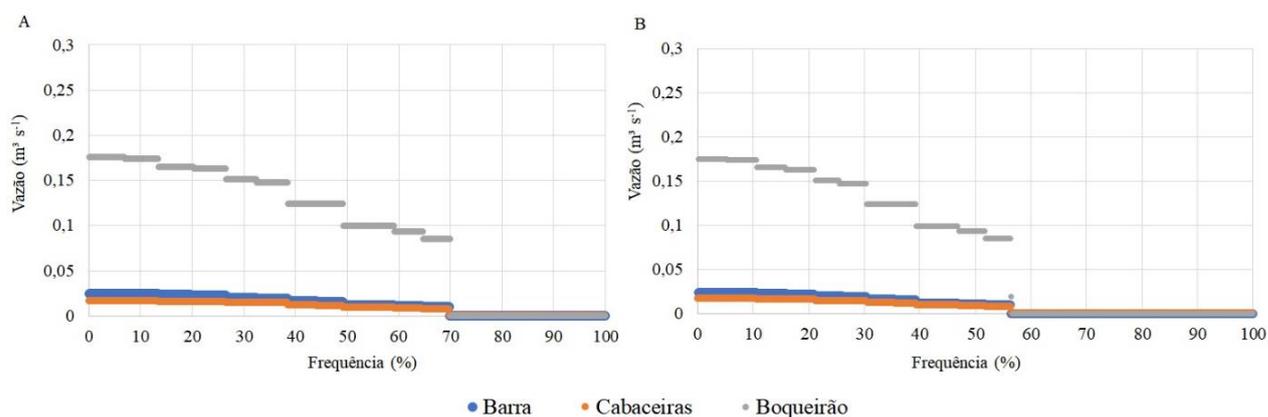
O abastecimento público atendido pelo reservatório Epitácio Pessoa não apresentou déficit e caso tivesse ocorrido interrupção de vazões do PISF no período de estudo, este também poderia ter sido plenamente atendido (Figura 46). O mesmo cenário foi observado para atendimento à demanda de abastecimento público proveniente do PISF.

O déficit de atendimento à demanda da irrigação exibiu redução quando comparados os cenários 1 e 2, salientando a importância dos resultados obtidos para o desenvolvimento socioeconômico local e manutenção das atividades agrícolas (Figura 47).

Observou-se no cenário 1, a ocorrência de déficits de atendimento em 70% do tempo, nos três municípios que correspondem a área de influência do reservatório Epitácio Pessoa,

correspondendo a um período de 35 anos. Em contrapartida, no cenário 2, o déficit de atendimento caiu para aproximadamente 56% do tempo, correspondendo a um período de 28 anos e 2 meses (Figura 47 B e Tabela 20).

Figura 47 - Curva de permanência do déficit de atendimento para irrigação nos municípios contemplados pelo reservatório Eptácio Pessoa, simulado no período de 1970 a 2019: A: Cenário 1 - sem influência das águas do PISF e B: Cenário 2 - com presença das águas do PISF



Fonte: A autora (2021).

Tabela 20 - Variação das vazões com déficit de atendimento para irrigação, nos municípios contemplados pelo reservatório Eptácio Pessoa, simulado no período de 1970 a 2019, nos cenários 1 e 2

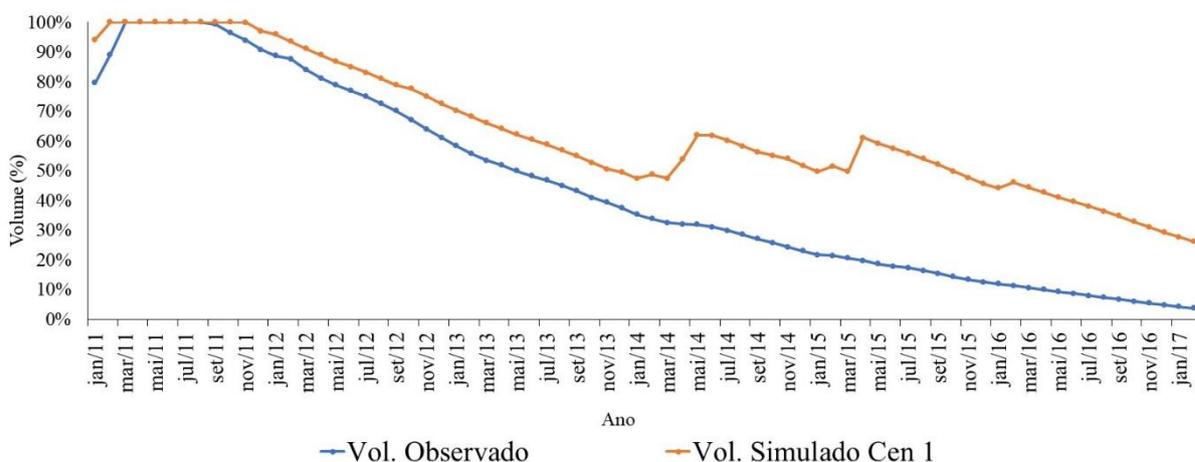
Município	Cenário 1	Cenário 2
Barra	0,01 a 0,024 m ³ s ⁻¹	0,01 a 0,024 m ³ s ⁻¹
Cabaceiras	0,007 e 0,016 m ³ s ⁻¹	0,007 e 0,016 m ³ s ⁻¹
Boqueirão	0,085 a 0,175 m ³ s ⁻¹	0,019 a 0,175 m ³ s ⁻¹

Fonte: A autora (2021).

Nos períodos críticos de estiagem compreendidos entre os anos de 1998, 2002 e de 2012 a 2016, a alocação de água na bacia resultou no comprometimento do abastecimento público, nos municípios atendidos pelo reservatório Eptácio Pessoa. Nestes períodos o atendimento à demanda não foi cessado por completo, mas sim racionado, chegando ao corte do fornecimento de 84 horas por semana em novembro de 2015, sendo salvo de um colapso de desabastecimento com a chegada das águas do PISF (RÊGO et al., 2017).

No cenário 1, o modelo conseguiu otimizar a alocação da água para o uso prioritário, nos períodos de seca entre 2012 e 2016, sem comprometer o atendimento à demanda para o abastecimento público (Figura 46 A). Para tal, às demandas de irrigação foram afetadas (Figura 47) e o volume de água do reservatório foi poupado (Figura 48).

Figura 48 - Percentual dos volumes (%) atingidos no reservatório Epitácio Pessoa em relação a capacidade total, nos anos de 2011 a 2016



Fonte: A autora (2022).

Segundo Rêgo et al., (2017), o racionamento nos municípios abastecidos pelo reservatório Epitácio Pessoa poderia ter sido evitado ou minimizado, atrasando seu início para quase 2 anos à frente e ocorrendo de forma mais branda, caso um conjunto de medidas mais eficientes e sustentáveis na gestão hídrica tivessem sido adotadas, sobretudo àquelas relacionadas ao atendimento das outorgas.

Lucena (2018), constatou a partir da simulação de cenários com diferentes medidas de gestão hídrica, que com a fiscalização e limitação de retiradas secundárias de água do reservatório, inclusive nos anos de maior afluência, o incentivo a medidas de controle de combate às perdas e o uso racional da água, o reservatório Epitácio Pessoa não teria chegado a níveis alarmantes no volume de água e o colapso no abastecimento público a mais de meio milhão de habitantes teria sido atenuado.

Foi considerado nas simulações o atendimento à demanda ambiental estimada para a área da bacia em estudo e constatou-se que uma vazão mínima de $0,3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ foi sempre atendida nos cenários trabalhados. Esta demanda foi avaliada com a finalidade de verificar a vazão ecológica mínima plenamente atendida, sem comprometimento das outras demandas (SANTOS e CUNHA, 2013).

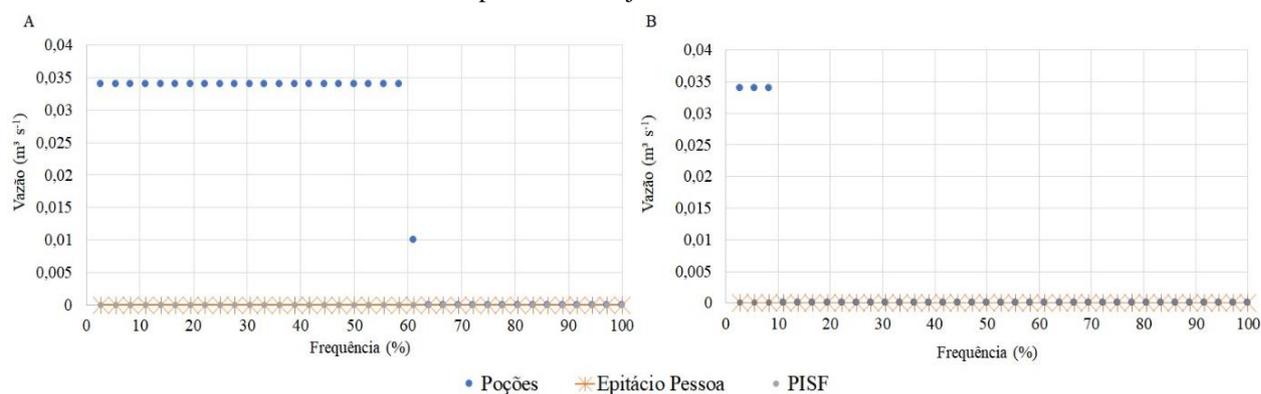
4.3.2.2 Cenários: 3 – vazão real e 4 – vazão máxima

Nos cenários 3 e 4, para demanda de abastecimento público, podemos observar déficit de atendimento apenas no reservatório Poções no cenário 3, e que com o aumento da vazão para $10 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (cenário 4), houve um avanço na disponibilidade de água para alocação. O déficit

reduziu de 61%, no cenário 3, para 8% do tempo no cenário 4 (Figura 49), representando atendimento integral em 22 meses no cenário 4, e em três meses no cenário 3.

Os déficits no atendimento à demanda de abastecimento público observados no cenário 3 ocorreram a partir de novembro/2017 e distribuíram-se nos demais anos, enquanto no cenário 4, ocorreram entre julho e setembro de 2018.

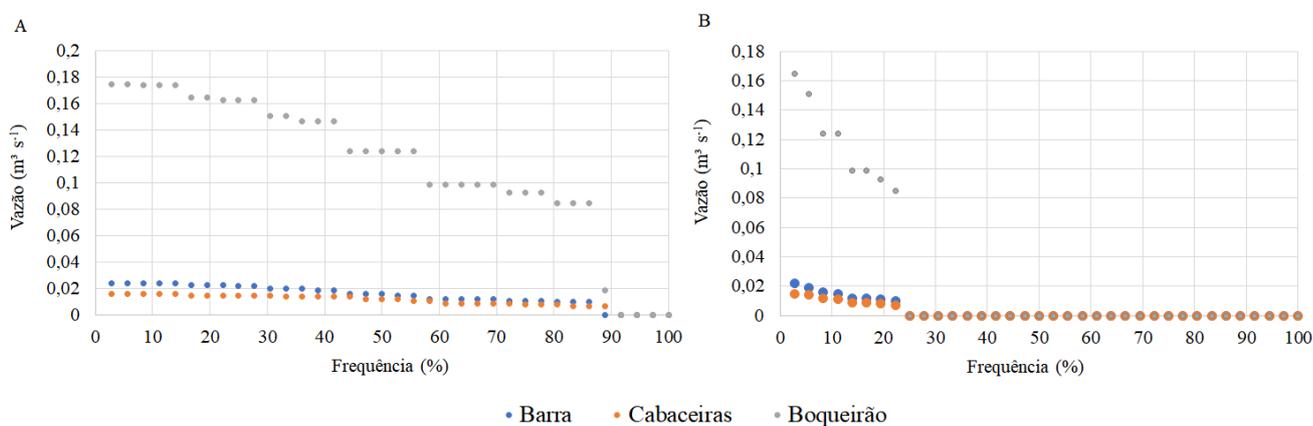
Figura 49 - Curva de permanência do déficit de atendimento para abastecimento público nos reservatórios Poções e Epitácio Pessoa e PISF (SIAA - Campina Grande e Cariri), simulado no período de 2017 a 2019: A: Cenário 3 - com vazão operada no Projeto e B: Cenário 4 - com vazão de $10 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$



Fonte: A autora (2021).

Para irrigação, houve algum déficit no atendimento em 84% de período (32 meses) no cenário 3, enquanto no cenário 4, ocorreu déficit no atendimento em 22% (8 meses) do período estudado (Figura 50). No cenário 3, apenas no período entre dezembro/2017 e abril/2018, a demanda foi atendida nos municípios estudados, com exceção de janeiro/2018, sem alcançar atendimento da demanda em Cabaceiras, e atendimento parcial em Boqueirão. No cenário 4, os meses de janeiro a agosto/2017, foram os únicos com déficit no atendimento (Tabela 21).

Figura 50 - Curva de permanência do déficit de atendimento para irrigação nos municípios contemplados pelo reservatório Epitácio Pessoa, simulado no período de 2017 a 2019: A: Cenário 3 - com vazão operada no Projeto e B: Cenário 4 - com vazão de $10 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$



Fonte: A autora (2021).

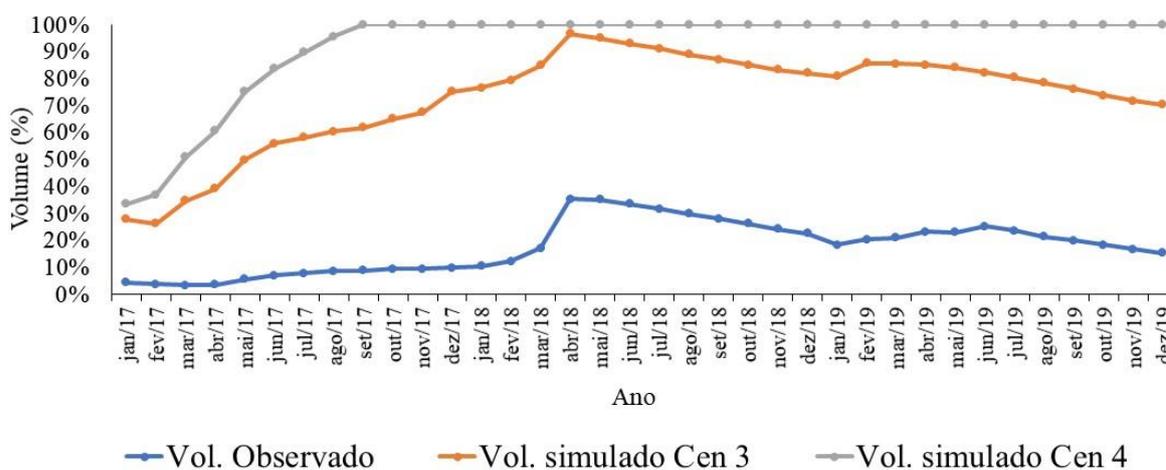
Tabela 21 - Variação das vazões com déficit de atendimento para irrigação, nos municípios contemplados pelo reservatório Epitácio Pessoa, simulado no período de 2017 a 2019, nos cenários 3 e 4

Município	Cenário 3	Cenário 4
Barra	0,01 a 0,024 m ³ s ⁻¹	0,01 a 0,022 m ³ s ⁻¹
Cabaceiras	0,007 e 0,016 m ³ s ⁻¹	0,007 e 0,015 m ³ s ⁻¹
Boqueirão	0,019 a 0,175 m ³ s ⁻¹	0,085 a 0,165 m ³ s ⁻¹

Fonte: A autora (2021).

Os déficits observados no atendimento às demandas de irrigação no reservatório Epitácio Pessoa, nos cenários 3 e 4, ocorreram porque o modelo priorizou a sustentabilidade do atendimento ao abastecimento público e a manutenção de uma cota de volume no reservatório. Na Figura 51, podemos observar que os volumes originais observados no reservatório atingiram o máximo de 30% da capacidade total, em abril de 2018, indicando que a prioridade dos gestores foi o atendimento a todas às demandas, mesmo que o volume deste viesse a atingir percentuais baixos.

Figura 51 – Percentual dos volumes (%) atingidos no reservatório Epitácio Pessoa em relação a capacidade total, nos anos de 2017 a 2019



Fonte: A autora (2022).

Os resultados das simulações observadas nos cenários 3 e 4 mostram que, com aumento da vazão do PISF, mesmo que de forma contínua, ainda existem problemas com atendimento às principais demandas outorgadas, chamando atenção para o uso prioritário, no reservatório Poções. Esses dados mostram que, os órgãos gestores precisam ter cautela na liberação de novas outorgas para uso da água na região e que precisam focar esforços em ações que priorizem a economia de água, a mudança nos padrões de uso e redução do desperdício (NIAYIFAR e PERONA, 2017; RÊGO et al., 2017; ROOBAVANNAN et al., 2017; SHOURIAN & MOUSAVI, 2017).

Araújo e Oliveira (2021) apontaram que, para atendimento às demandas do reservatório Epitácio Pessoa é necessário implementar mecanismos de aumento de eficiência hídrica na região, como exemplo, pode-se citar o auxílio aos irrigantes para implementação do uso de técnicas de irrigação mais eficientes. Rêgo et al. (2017) desaprovam a gestão hídrica desenvolvida no reservatório Epitácio Pessoa nos anos de estiagem, destacando a falta de implementação de instrumentos e medidas sustentáveis apropriadas e gestão inadequada com enfoque no atendimento às normas legais de outorga.

4.4 MODELAGEM DA QUALIDADE DA ÁGUA NO ALTO CURSO DO RIO PARAÍBA

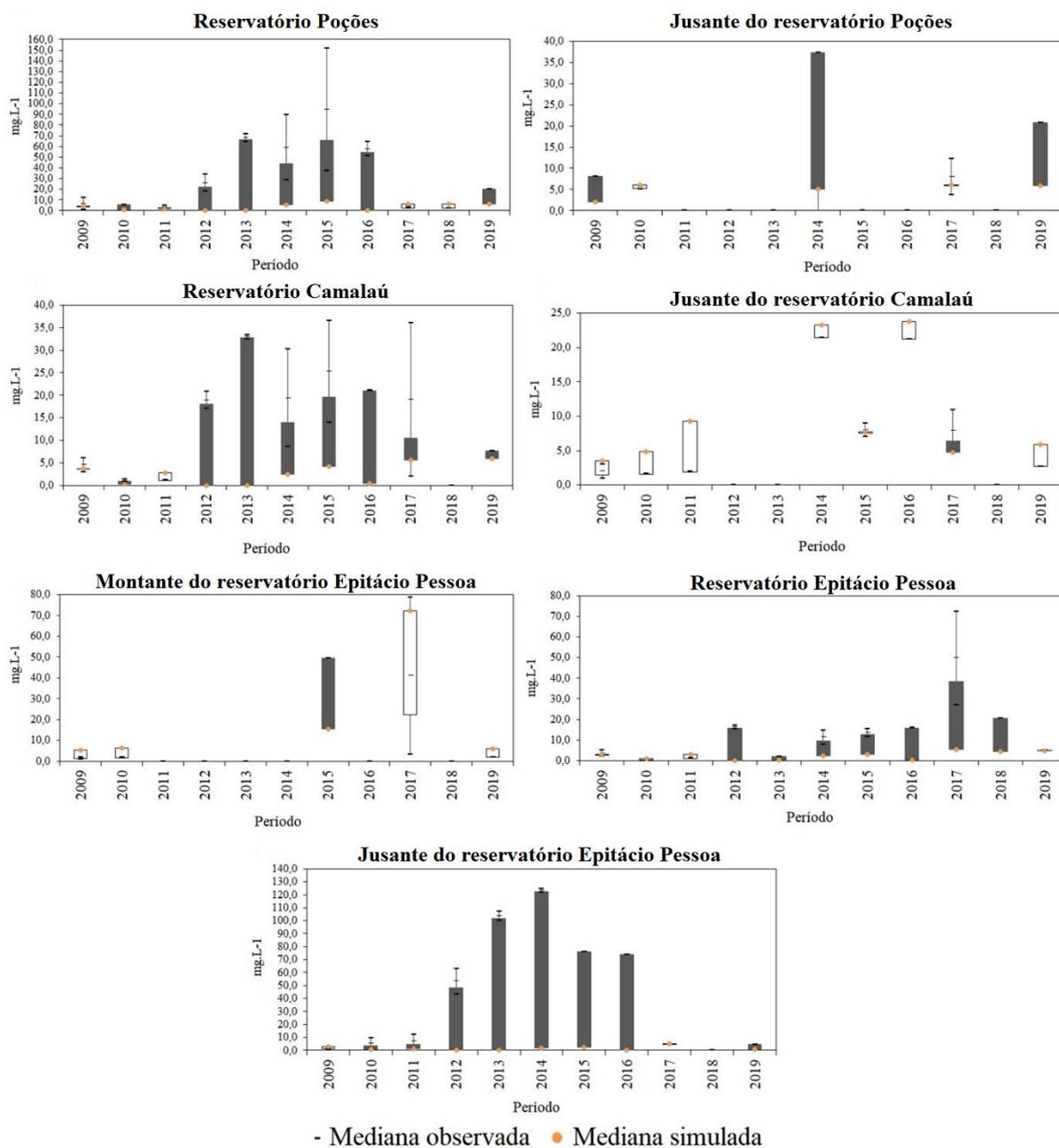
4.4.1 Calibração do modelo de qualidade da água

No processo de calibração do modelo foram considerados dois principais requisitos, as medianas das concentrações mensais dos parâmetros DBO, OD, fósforo total e nitrogênio total simuladas pelo AcquaNet, e dos dados observados, a partir de amostras coletadas em campo e analisadas em laboratório (PBA 22), durante o período de 2009 a 2019.

As Figuras 50 a 53 apresentam os perfis das concentrações de DBO, OD, fósforo total e nitrogênio total, do *box-plot* dos pontos monitorados em campo e a mediana dos dados simulados. As medianas dos dados calculados pelo modelo podem ser observadas dentro dos intervalos interquartis de 25% (1º quartil) e 75% (3º quartil), das medianas dos dados observados, conferindo assim uma calibração adequada e que o modelo é representativo ao ambiente estudado para simulação dos cenários.

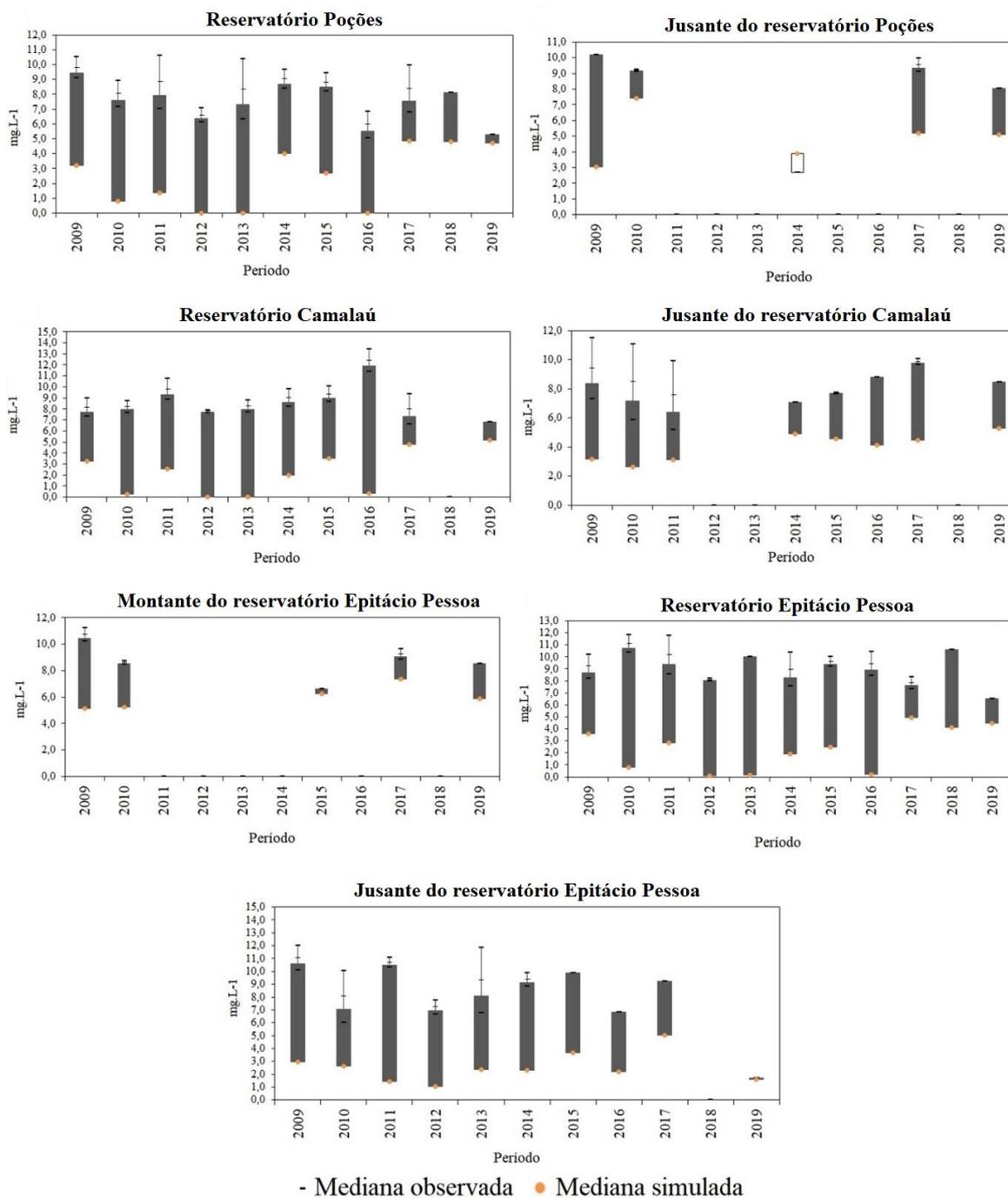
Apesar, da ocorrência de *outliers*, destacando o reservatório Poções (Q68) nas Figuras 52 a 55 e a jusante do reservatório Epitácio Pessoa (Q74) na Figura 52, elas mantiveram-se dentro do limite interquartil dos dados calculados, quando houve ocorrência de dados para os pontos observados em campo, mantendo uma concordância aceitável entre os valores calculados e observados.

Figura 52 – *Box-plot* da variabilidade da DBO no Alto Curso do rio Paraíba, no período de 2009 a 2019, simulada pelo AcquaNet e observado *in situ*



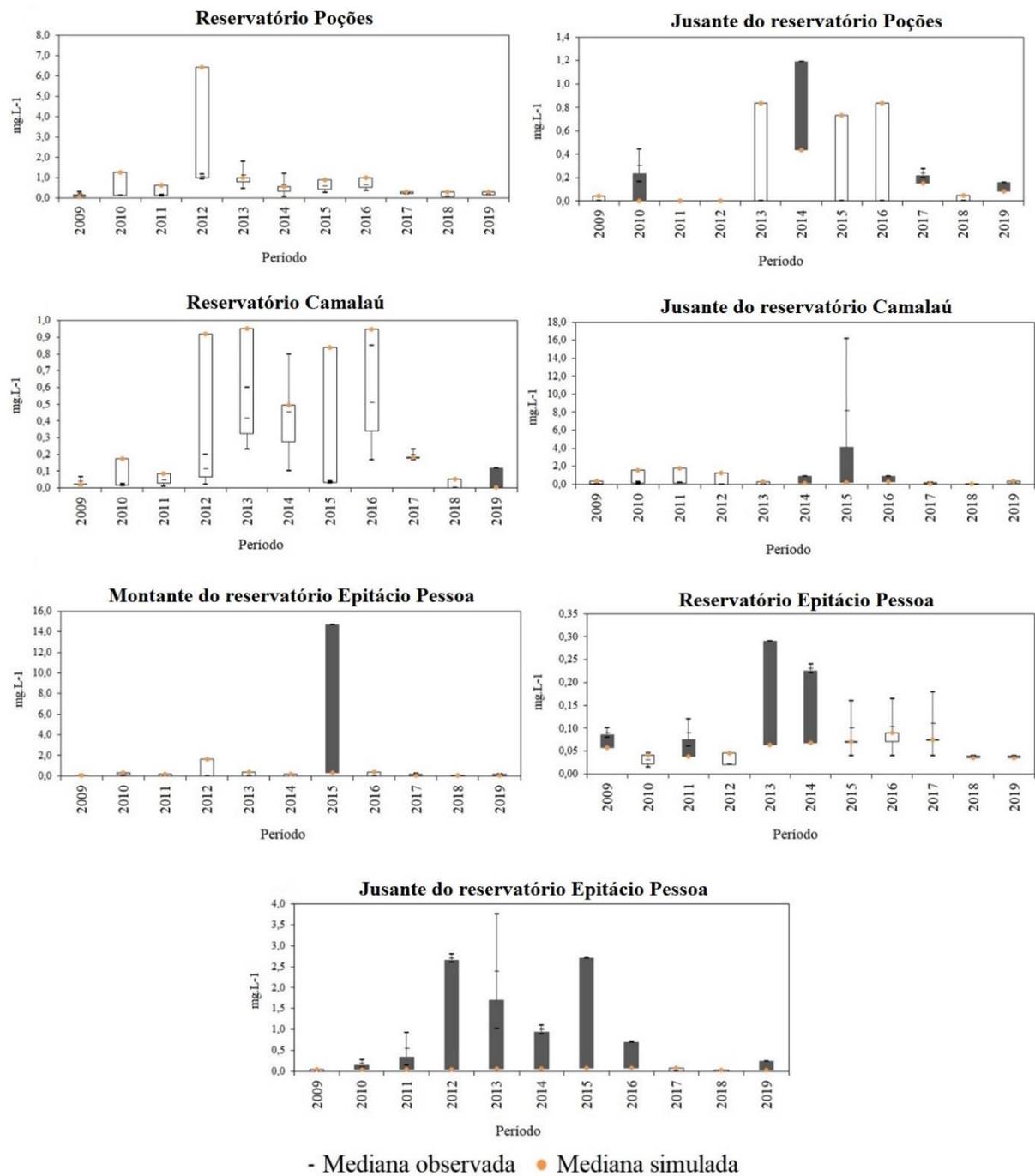
Fonte: A autora (2021).

Figura 53 – *Box-plot* da variabilidade do OD no Alto Curso do rio Paraíba, no período de 2009 a 2019, simulada pelo AcquaNet e observada *in situ*



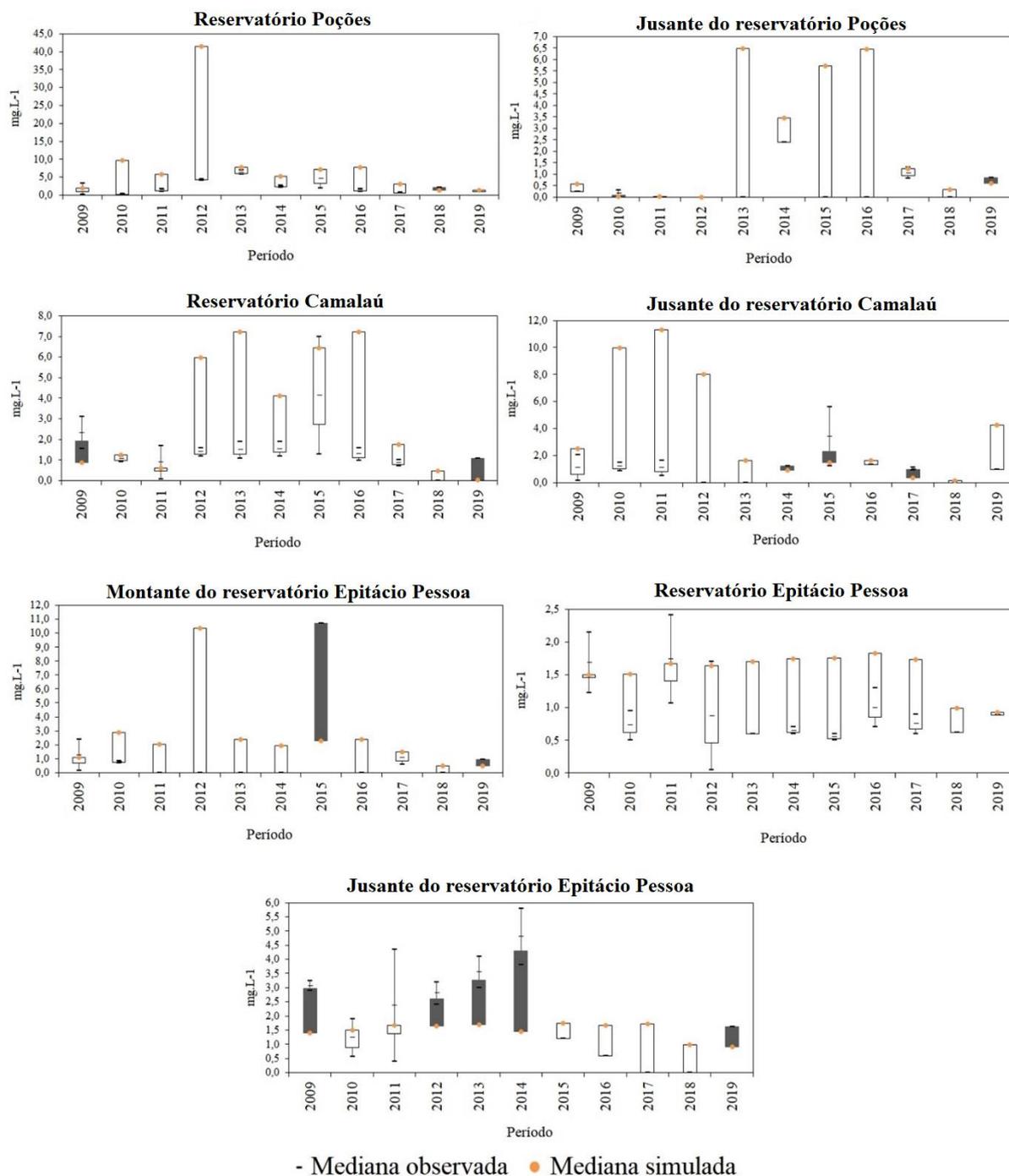
Fonte: A autora (2021).

Figura 54 – Box-plot da variabilidade do fósforo total no Alto Curso do rio Paraíba, no período de 2009 a 2019, simulada pelo AcquaNet e observada *in situ*



Fonte: A autora (2021).

Figura 55 – *Box-plot* da variabilidade do nitrogênio total no Alto Curso do rio Paraíba, no período de 2009 a 2019, simulada pelo AcquaNet e observado *in situ*



Fonte: A autora (2021).

Foram adotadas taxas de decaimento (k_d) e sedimentação (k_s) da DBO e o coeficiente de reeração (k_a) diferentes para cada trecho, sendo que a variação desses parâmetros foram entre 0,01 e 0,5 dia⁻¹ para k_d , 0,005 e 0,5 dia⁻¹ para k_s e 0,005 e 4,0 dia⁻¹ para k_a . Nunes (2000) adotou k_d de 0,14 a 0,6 d⁻¹, k_s médio de 0,2 dia⁻¹ e k_a de 2 a 15 dia⁻¹ em trechos do rio

Bodocongó, afluente ao reservatório Epitácio Pessoa, no período de março a junho de 1999, que apresentou vazões com média mínima de $0,27 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e média máxima de $0,47 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

Os coeficientes de decaimento referentes ao fósforo e nitrogênio adotados tiveram as seguintes médias: coeficiente de decaimento do fósforo de $0,005 \text{ dia}^{-1}$, taxa de reação do nitrogênio orgânico de $0,1 \text{ dia}^{-1}$, taxa de reação da amônia e do nitrito iguais a $0,2 \text{ dia}^{-1}$, coeficiente do fator de nitrificação de $0,35 \text{ dia}^{-1}$, coeficientes de meia saturação do nitrogênio e do fósforo iguais a $0,005 \text{ dia}^{-1}$.

Ressalta-se que os trechos amostrados em campo são provenientes de monitoramentos pontuais, com ocorrência semestral, e que em alguns anos não foi possível realizar aferição dos parâmetros por questões hidrológicas e climáticas, por tratar-se de um rio de regime intermitente, acompanhado de períodos de seca na região. Por outro lado, o modelo realiza simulação da concentração dos parâmetros estudados mesmo ocorrendo quantidade mínima de água. Quando a vazão é zero, o balanço de massa é zerado.

O modelo busca representar o comportamento médio, de acordo com o regime permanente das vazões inseridas na rede, por meio de reação cinética de 1ª ordem, numa escala mensal, apresentando uma tendência, portanto, o modelo não representa tal qual ocorre na natureza, onde temos reações cinéticas em escala micro, diárias ou horárias, apresentando respostas mais rápidas. A disponibilidade de dados observados é escassa para aferição, sendo possível apenas a comparação com um valor por semestre.

A escassez de dados monitorados, o desconhecimento de todas as fontes de poluição para a área de estudo e a falta de informações apoiadas em registros confiáveis da carga poluidora lançada, possivelmente explique a subestimativa das concentrações de alguns parâmetros calculados pelo modelo, como a DBO, assim como a ocorrência de *outliers* nas concentrações de OD observados, as quais deveriam baixar quando a DBO se encontra muito alta. Silva et al. (2017) também observaram em seu estudo, que alguns dos parâmetros analisados (nitrogênio orgânico e amoniacal, nitrito, nitrato e coliformes termotolerantes) foram subestimados pelo modelo de qualidade da água utilizado e associaram este resultado a carência de dados sobre os lançamentos das cargas poluidoras.

Lima et al. (2018) destacam que, uma das principais fontes poluidoras responsáveis pela eutrofização de corpos hídricos no nordeste brasileiro são as condições deficitárias das Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs), a falta de saneamento básico sobretudo, na zona rural, a pecuária e a atividade agrícola. Caracterizando estas fontes como difusas e de difícil dimensionamento dos seus lançamentos e impactos, tornando a acessibilidade a essas informações ainda mais complexas.

4.4.2 Análise dos cenários de qualidade da água

4.4.2.1 Cenários: 1 – sem PISF e 2 – com PISF

Os cenários de qualidade da água, analisando os parâmetros DBO, OD, fósforo total e nitrogênio amoniacal total, correspondem ao cenário 1, sem presença das águas do PISF, e o cenário 2, com presença das águas do PISF, no período de 1970 a 2019. A comparação entre os cenários 1 e 2, permitiu observar o quanto os diferentes volumes armazenados nos reservatórios e as vazões ao longo do curso da bacia, afetam distintamente a cinética das reações químicas dos parâmetros estudados.

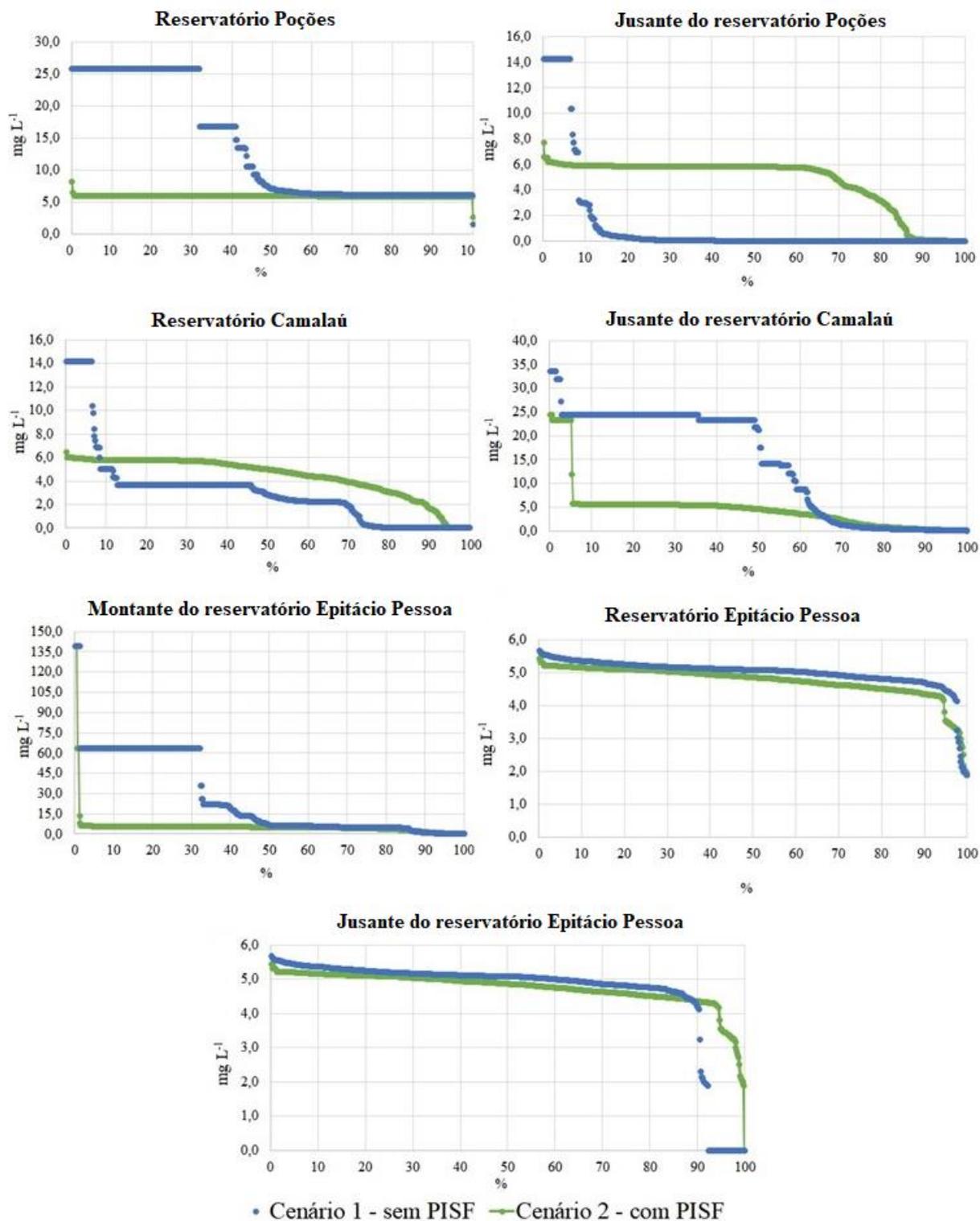
As curvas de permanência da DBO apresentadas na Figura 56, indicam que quando comparando os cenários 1 e 2, pode-se observar que a presença das águas do PISF (cenário 2), contribuem para reduzir e estabilizar as concentrações ao longo do Alto Curso do rio Paraíba, em níveis abaixo das obtidas no cenário 1, apresentando maior incidência de concentrações dentro dos limites exigidos pela legislação, com exceção dos trechos a jusante do reservatório Poções (Q69) e no reservatório Camalaú (Q70).

No reservatório Poções, as concentrações estiveram acima de $5,0 \text{ mg L}^{-1}$ nos dois cenários. No entanto, pode-se observar redução nas concentrações no cenário 2 em relação ao cenário 1. No cenário 1, os valores de DBO estiveram acima de 10 mg L^{-1} durante 45% do tempo, enquanto, no cenário 2, em aproximadamente 99% do tempo, as concentrações variaram entre $5,7 \text{ mg L}^{-1}$ e $6,5 \text{ mg L}^{-1}$.

As concentrações a jusante do reservatório Poções, atenderam a legislação em 92% do período no cenário 1 e em 31% no cenário 2. A DBO permanece zero durante 80% do tempo no cenário 1. No cenário 2 – com PISF, a concentração conservar-se em torno de 6 mg L^{-1} durante 60% do tempo. No reservatório Camalaú, o atendimento aos padrões de qualidade da água ocorre em 88% do tempo no cenário 1 e 47% no cenário 2. A concentração de DBO no cenário 1 permanece abaixo do cenário 2 em 83% do tempo, sendo zero durante 20% deste tempo (cenário 1). Esta condição pode estar associada à falta de vazão natural e consequente aporte de carga orgânica ao reservatório durante meses contínuos. Com o consumo da matéria orgânica a DBO chega a zero. No cenário 2, há vazão contínua de carga orgânica entrando no reservatório Camalaú, resultando em concentrações mais elevadas de DBO.

Os efeitos positivos mais pronunciados foram a jusante do reservatório Camalaú e a montante do reservatório Eptácio Pessoa, onde observaram-se reduções das concentrações de DBO do cenário 1 para o cenário 2, de 24 mg L^{-1} para 4 mg L^{-1} em 45% do tempo, e de 60 mg L^{-1} para 10 mg L^{-1} em 30% do tempo, respectivamente.

Figura 56 - Curva de permanência da DBO, no Alto Curso do Rio Paraíba, no período de 1970 a 2019, com cenários representando presença e ausência das águas do PISF



Fonte: A autora (2021).

Os percentuais de ocorrência de concentrações abaixo do limite máximo, de 5,0 mg O₂ L⁻¹, para rios de Classe 2, preconizado pela Resolução Conama 357/05, (BRASIL, 2005), se destacaram a partir da jusante do reservatório Camalaú. Este trecho apresentou 60% do tempo com DBO dentro do recomendado pela resolução, no cenário com PISF (cenário 2) e em 36% do tempo no cenário sem o PISF (cenário 1).

No trecho a montante do reservatório Epitácio Pessoa, a DBO esteve 50% do tempo dentro do preconizado pela Resolução no cenário 2, e 98% do tempo apresentou-se com concentrações próximas a 6 mg O₂ L⁻¹. Enquanto no cenário 1, a concentração esteve 30% do tempo dentro do limite recomendado pela legislação e 32% com altas concentrações, acima de 60 mg O₂ L⁻¹. Os altos valores de DBO, no cenário 1, nesse trecho, podem estar relacionados a influência da sub-bacia do rio Taperoá.

No reservatório Epitácio Pessoa e no trecho a jusante deste, foram observadas concentrações da DBO dentro dos limites da legislação em 70% do período no cenário 2, já no cenário 1, esse percentual reduziu para 30% e 40%, respectivamente. Apesar da melhoria no atendimento a legislação, com a presença das águas do PISF nesses trechos mencionados acima, quando comparados os dois cenários não foi observada expressiva influência do PISF nas concentrações da DBO (Figura 56).

As curvas de permanência observadas para o OD, exibem concentrações com tendência a estabilizar-se ao longo do Alto Curso do rio Paraíba e manter-se em intervalo maior de tempo com valores acima do recomendado pela legislação brasileira, para classe 2, de no mínimo 5,0 mg O₂ L⁻¹ (BRASIL, 2005), no cenário 2 quando comparado ao cenário 1 (Figura 57). Com exceção do trecho a montante do reservatório Epitácio Pessoa, que apresentou concentrações mais elevadas e valores dentro do limite da legislação em 68% do tempo no cenário 1, enquanto no cenário 2 esse percentual reduziu a 52%.

No reservatório Poções, pode-se observar que o atendimento à legislação no cenário 1 ocorreu em 40% do período de estudo, e no cenário 2, em 98%. No trecho a jusante do reservatório Poções, apesar do cenário 1 apresentar resultados mais elevados de OD em relação ao cenário 2, este parâmetro manteve-se em maior intervalo de tempo com concentrações acima de 5,0 mg O₂ L⁻¹ no cenário 2 (70%), enquanto no cenário 1, esse percentual foi de 55%. Foram observadas concentrações inferiores a 3 mg O₂ L⁻¹ em 31% do tempo no cenário 1 e 16% no cenário 2.

No reservatório Camalaú, em ambos os cenários, as concentrações de OD atenderam a legislação brasileira em 40% do tempo, mas no cenário 1, as concentrações reduziram mais drasticamente, chegando a permanecer inferior a 3 mg O₂ L⁻¹ em 42% do período. No cenário

2, em apenas 18% do tempo foram exibidas concentrações inferiores a $3 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$. A jusante deste reservatório, no cenário 1, não foram observadas concentrações dentro dos padrões exigidos pela legislação, já no cenário 2, o percentual do período de atendimento foi de 35%.

No reservatório Epitácio Pessoa e a jusante deste, as concentrações de OD não apresentaram grandes mudanças entre os cenários estudados. Com relação ao atendimento à legislação nacional, no cenário 1, as concentrações no reservatório Epitácio Pessoa estiveram acima do limite mínimo recomendado para classe 2 em 9% do período, enquanto no cenário 2, o percentual subiu para 37% do período de estudo.

À jusante do reservatório Epitácio Pessoa, em 8% do período o OD chegou a zero no cenário 1. Este fato pode ter sido influenciado pelas ocasiões em que a descarga do reservatório Epitácio Pessoa foi interrompida durante períodos de estiagem na região. O mesmo pode ser observado em outros trechos, como nos reservatórios Poções e Camalaú, e nas simulações realizadas para a DBO (Figura 56). Em ambos os cenários, as concentrações de OD permaneceram acima dos limites preconizados em 87% do período.

Em alguns trechos a relação entre DBO e OD se mostrou proporcional. À jusante do reservatório Poções e no reservatório Camalaú foram observadas concentrações de OD superiores no cenário 1 (Figura 57), inversamente ao ocorrido com as concentrações da DBO para o mesmo cenário (Figura 56).

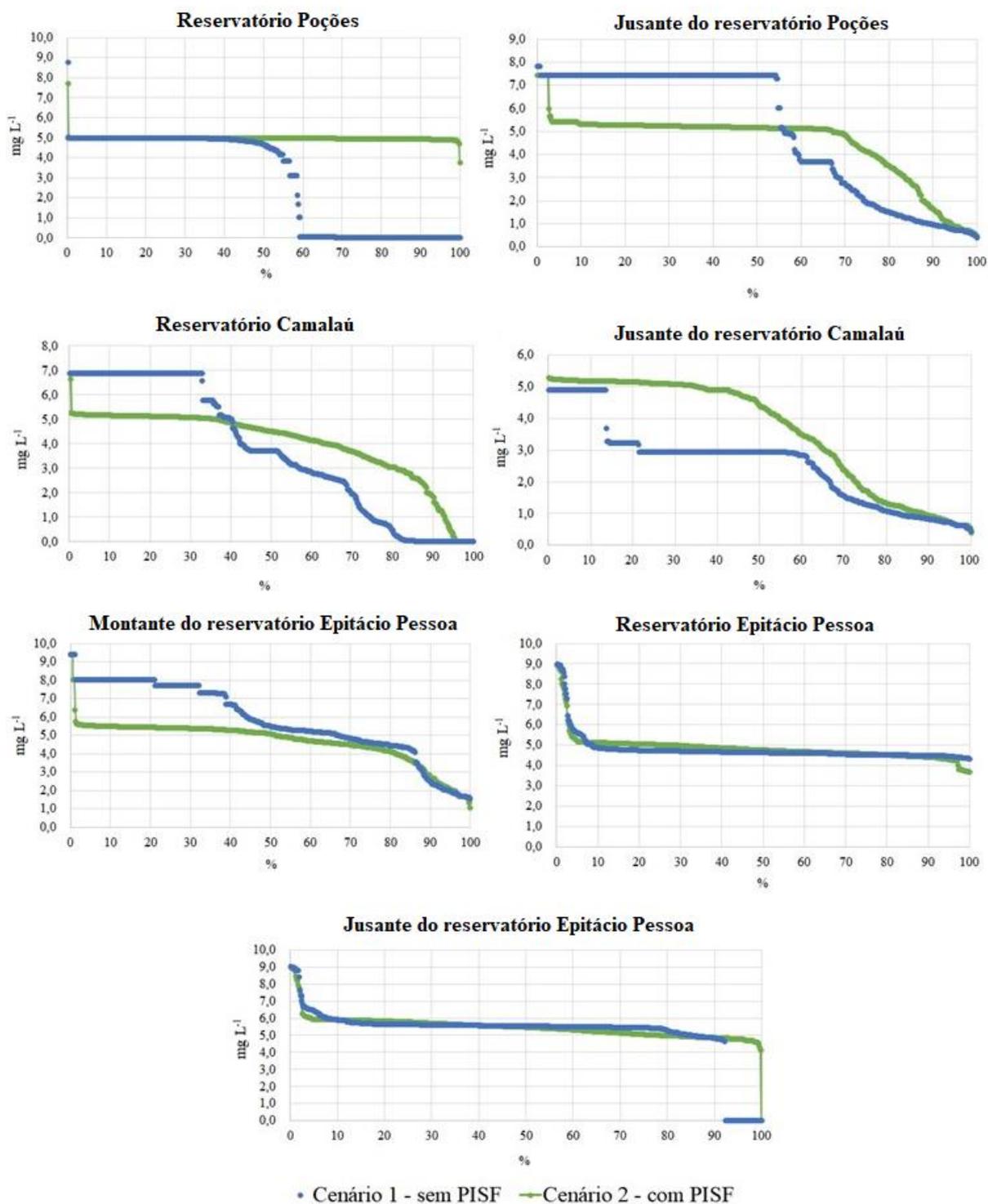
A existência de vários reservatórios numa bacia pode ocasionar melhoria na qualidade da água nos trechos adjacentes, devido a capacidade de atenuar a carga orgânica e aeração da água promovendo oxigenação, ainda, pela capacidade de armazenamento de grandes volumes de água levando ao aumento do tempo de residência desta e maior decaimento da matéria orgânica (TERCINI e MÉLLO JUNIOR, 2016).

Estas características supracitadas podem estar relacionadas ao observado em alguns trechos, como à jusante do reservatório Poções, que exibiu resultados mais adequados em relação aos limites indicadores da qualidade da água no cenário 1, em que o tempo de residência da água no reservatório Poções era maior devido à redução das vazões de descarga, acarretando diminuição de entrada de nutrientes e aumento da capacidade de depuração do rio no trecho a jusante.

Além disso, outro ponto observado é que neste trecho especificamente, a diluição dos nutrientes na água através do aumento no aporte de volume deste recurso no cenário 2, não foi suficiente para equilibrar o ecossistema, proporcionando melhoria no padrão de qualidade. Este resultado indica que é necessário investir em medidas eficazes para aumentar a capacidade de

tratamento de esgoto e efluentes dos municípios inseridos nas bacias dos rios São Francisco e Paraíba.

Figura 57 - Curva de permanência da OD, no Alto Curso do Rio Paraíba, no período de 1970 a 2019, com cenários representando presença e ausência das águas do PISF



Fonte: A autora (2021).

A simulação do fósforo total apresentou redução nas concentrações no cenário 2, quando comparado ao cenário 1, no reservatório Poções e no trecho entre o reservatório Camalaú e a montante do reservatório Epitácio Pessoa. No entanto, no reservatório Poções (Q68), as concentrações do fósforo total no cenário 2, permaneceram durante todo o período, acima dos limites recomendados pela legislação para classe 2, com concentração máxima de $0,39 \text{ mg L}^{-1}$. No cenário 1, em 95% do período apresentou concentrações acima do limite máximo exigido de $0,03 \text{ mg L}^{-1}$, para classe 2 (Figura 58).

A jusante do reservatório Poções ocorreu aumento das concentrações de fósforo no cenário 2 em relação ao cenário 1, e o percentual do período com atendimento aos padrões de qualidade da água foi maior no cenário 1 (36%), em relação ao cenário 2 (21%) (Figura 58).

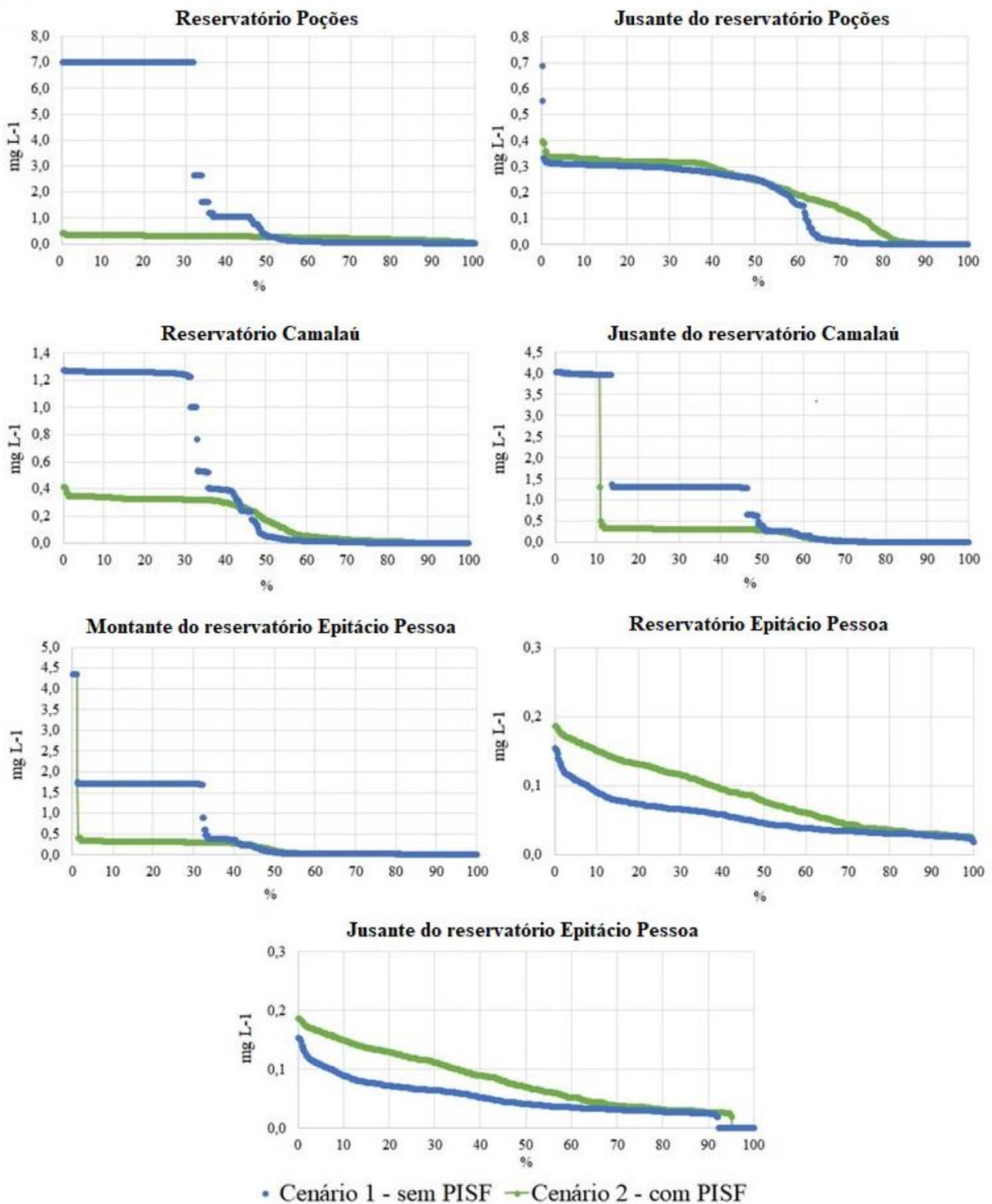
No reservatório Camalaú (Q70), a concentração máxima de fósforo total foi de $0,41 \text{ mg L}^{-1}$ no cenário 2 e de $1,27 \text{ mg L}^{-1}$ no cenário 1, mas apesar da redução nas concentrações com a presença das águas do PISF, o cenário 1 permaneceu com 45% do período com valores do fósforo abaixo do limite máximo recomendado pela legislação brasileira, enquanto, no cenário 2, permaneceu apenas em 30% do período.

No trecho a jusante do reservatório Camalaú, as concentrações do fósforo total apresentaram-se dentro dos limites exigidos para ambientes intermediários, em 34% do tempo no cenário 1 e 33% no cenário 2. Ambos os cenários exibiram picos de 4 mg L^{-1} , no entanto pode-se observar redução mais expressiva das concentrações, em 40% do tempo, no cenário 2 em relação ao cenário 1. A montante do reservatório Epitácio Pessoa foram observados picos de $4,3 \text{ mg L}^{-1}$ em ambos os cenários, e concentrações dentro dos limites exigidos para ambientes intermediários, em 50% do tempo no cenário 1 e 46% no cenário 2.

No reservatório Epitácio Pessoa e a jusante deste, assim como observado a jusante do reservatório Poções, ocorreu aumento das concentrações de fósforo no cenário 2 em relação ao cenário 1.

No reservatório Epitácio Pessoa, o cenário 1 apresentou 22% do tempo com concentrações dentro do limite exigido pela legislação, e no cenário 2, com apenas 4% do período. No trecho a jusante, permaneceu com 58% do tempo com concentrações abaixo do limite máximo de $0,05 \text{ mg L}^{-1}$ para ambientes intermediários no cenário 1 e 38% do período no cenário 2.

Figura 58 - Curva de permanência do fósforo total, no Alto Curso do Rio Paraíba, no período de 1970 a 2019, com cenários representando presença e ausência das águas do PISF



Fonte: A autora (2021).

O nitrogênio amoniacal total no Alto Curso do rio Paraíba apresentou redução das concentrações no cenário 2 – com águas do PISF em relação ao cenário 1, com exceção do trecho a jusante do reservatório Poções (Q69) (Figura 59). Nesse trecho os valores permaneceram dentro do limite máximo recomendado pela legislação para classe 2, em 26% do período no cenário 1 e em 14% no cenário 2 (Figura 59).

A avaliação do nitrogênio está atrelada a do pH mas, fica impraticável realizar esta correlação numa análise de tendência como as apresentadas aqui, então será considerado o valor máximo exigido de $3,7 \text{ mg L}^{-1}$ pela Resolução Conama 357/05 (classe 2), a fim de comparar quais dos dois cenários estudados encontram-se mais perto dos padrões de qualidade da água exigidos.

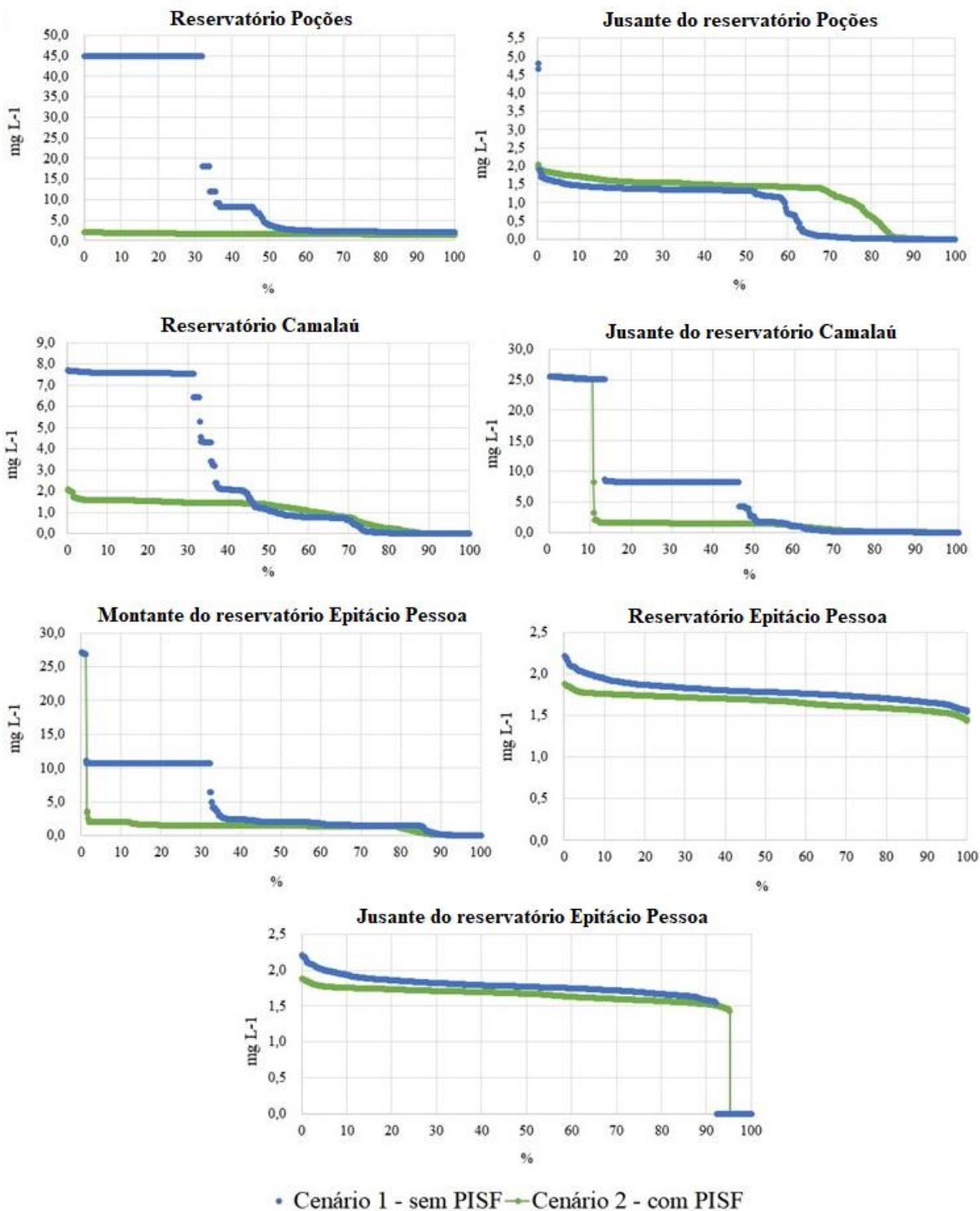
No reservatório Poções (Q68) foram observadas as concentrações mais elevadas de nitrogênio no cenário 1, com valor máximo de $44,9 \text{ mg L}^{-1}$ (32% do tempo), enquanto no cenário 2, a concentração máxima foi de $1,99 \text{ mg L}^{-1}$. O percentual do tempo de atendimento à legislação foi de 50% no cenário 1 e 100% no cenário 2.

Nos reservatórios Camalaú e Epitácio Pessoa, e no trecho a jusante do reservatório Epitácio Pessoa, o nitrogênio total permaneceu com valores abaixo de $2,1 \text{ mg L}^{-1}$ no cenário 2, enquanto, no cenário 1, os valores máximos foram de $7,7 \text{ mg L}^{-1}$, $2,21 \text{ mg L}^{-1}$ e $2,2 \text{ mg L}^{-1}$, respectivamente. No reservatório Camalaú foi observado que em 64% do período o nitrogênio atendeu ao limite máximo exigido no cenário 1, e no cenário 2 atendeu em 100% do tempo. No reservatório Epitácio Pessoa e a jusante dele, o atendimento à legislação foi absoluto nos dois cenários estudados.

Nos trechos lóticos/intermediários a jusante do reservatório Camalaú (Q71) e a montante do reservatório Epitácio Pessoa (Q72), nos cenários 1 e 2, foram observados picos de $25,5 \text{ mg L}^{-1}$ e $27,1 \text{ mg L}^{-1}$, respectivamente. A jusante do reservatório Camalaú o pico foi observado em 13% do tempo no cenário 1 e 11% no cenário 2, mas predominaram concentrações entre $0,005 \text{ mg L}^{-1}$ a $8,7 \text{ mg L}^{-1}$ no cenário 1 e $0,016 \text{ mg L}^{-1}$ a $3,27 \text{ mg L}^{-1}$ no cenário 2. O atendimento aos padrões da legislação brasileira para classe 2 foi de 51% do período no cenário 1 e 89% no cenário 2.

A montante do reservatório Epitácio Pessoa o pico já mencionado acima permaneceu por menos de 2% nos dois cenários estudados. As concentrações que predominaram no cenário 1 foram entre $0,25 \text{ mg L}^{-1}$ a $11,0 \text{ mg L}^{-1}$ e no cenário 2, entre $0,25 \text{ mg L}^{-1}$ a $3,6 \text{ mg L}^{-1}$. Neste trecho o nitrogênio esteve dentro dos padrões em 66% do período no cenário 1 e 99% no cenário 2.

Figura 59 - Curva de permanência do nitrogênio amoniaco total, no Alto Curso do Rio Paraíba, no período de 1970 a 2019, com cenários representando presença e ausência das águas do PISF



Fonte: A autora (2021).

Nos cenários simulados foi observada aproximação entre os valores das concentrações e as tendências no reservatório Epitácio Pessoa (Q73) e no trecho a jusante (Q74). Esta conexão pode estar relacionada com a proximidade dos pontos monitorados, onde o Q74 está localizado imediatamente após a descarga do reservatório (Q73), e, portanto, na simulação não está sendo considerado tempo suficiente para as taxas de decaimento dos nutrientes influenciarem a qualidade da água. Além da carência de dados referente aos lançamentos nesta localidade, que pode estar subestimando os resultados simulados. Uma vez que, no entorno deste perímetro há presença de residências, que podem estar lançando seus esgotos diretamente no rio e utilizando a água para usos recreativos, entre outros.

Comparando os parâmetros indicadores da qualidade da água analisados nos dois cenários, pode-se observar no cenário 2, que as concentrações tenderam a reduzir, estabilizar-se ou a se manter, por maior período, resultados dentro dos limites preconizados pela legislação ou aproximados a estes limites. Com exceção da DBO, OD, PT e NT no trecho a jusante do reservatório Poções, da DBO no reservatório Camalaú, do OD no trecho a montante do reservatório Epitácio Pessoa e do PT no reservatório Epitácio Pessoa e no trecho a jusante dele, os quais apresentaram resultados mais favoráveis no cenário 1.

Outros trabalhos no Brasil e no mundo também registraram redução nas concentrações de nutrientes após eventos de transferência de bacias (LANE et al., 2001; LI et al., 2013; ZENG et al., 2015; MAMEDE et al., 2018; ZANG et al., 2018; BARBOSA et al., 2021).

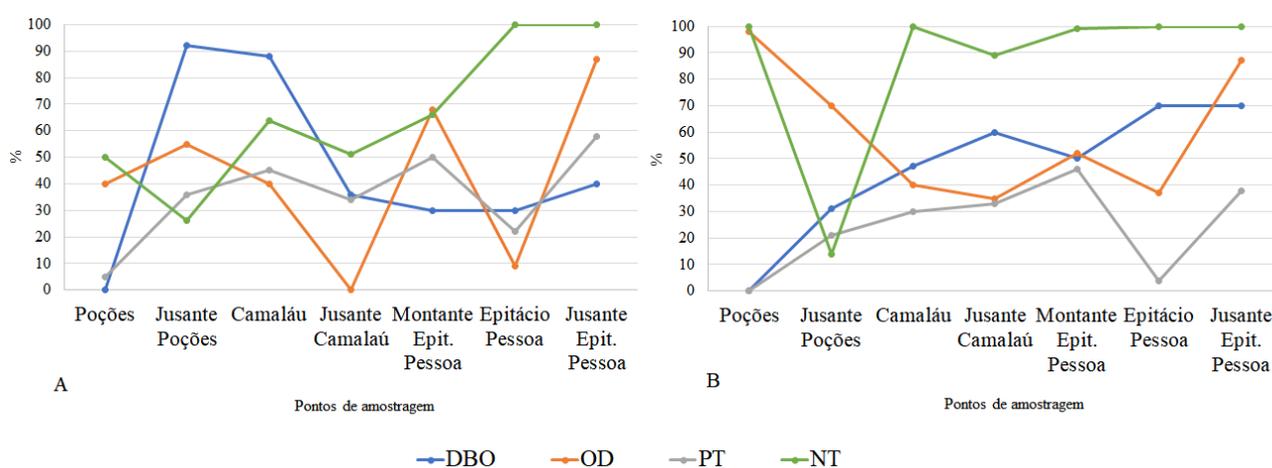
Barbosa et al. (2021) analisaram a influência da chegada das águas do PISF no rio Paraíba, e verificaram que a partir do início de operação do projeto houve redução do estado trófico e dos índices de poluição da água no reservatório Poções, e o contrário ocorrendo nos trechos sucessivos na bacia. Os autores observaram diminuição significativa do fósforo total, no reservatório Poções, em contrapartida, nos reservatórios Camalaú e Epitácio Pessoa, esse parâmetro apresentou aumento significativo das suas concentrações.

O reservatório Poções apresenta menor volume e é mais raso que os demais reservatórios estudados. Esta característica hidráulica associada ao aumento da vazão e do volume de água no cenário 2, pode ter influenciado uma maior redução das concentrações no reservatório Poções, do que o observado nos demais reservatórios, quando comparados os dois cenários estudados. Neste caso, não é necessário grandes quantidades de água para realizar a diluição na coluna de água, quando comparados aos reservatórios de maior porte, e o aumento da vazão seguido de descarga a jusante, promoveu remoção de poluentes (MAMEDE et al., 2018).

Apesar da redução nas concentrações, nem sempre foi possível observar atendimento aos critérios estabelecidos pela Resolução Conama 357/2005 para classe 2 (Figura 60). No cenário 2, pode-se observar os seguintes parâmetros que aumentaram sua permanência dentro dos padrões da qualidade da água na área de estudo:

1. Reservatório Poções (Q68): OD e NT;
2. A jusante do reservatório Poções (Q69): OD;
3. Reservatório Camaláu (Q70): NT;
4. Jusante do reservatório Camaláu (Q71): DBO, OD e NT;
5. Montante do reservatório Epitácio Pessoa (Q72): DBO e NT;
6. Reservatório Epitácio Pessoa: DBO e OD;
7. Jusante do reservatório Epitácio Pessoa: DBO.

Figura 60 – Percentual de atendimento aos padrões de qualidade da água estabelecidos pela Resolução Conama 357/05, no Alto Curso do rio Paraíba, no período de 1970 a 2019. A- Cenário 1; B- Cenário 2



Fonte: A autora (2022).

De acordo com Barbosa et al. (2021), as diferentes influências na qualidade da água dos reservatórios Poções, Camaláu e Epitácio Pessoa, no cenário 2, pode ser explicada por vários fatores. No reservatório Poções pode estar associada a qualidade da água recebida, pois apesar do reservatório Itaparica, local de captação de água do PISF, ter histórico de eutrofização, a água transposta passou por 12 novos reservatórios em cascata, sem histórico de eutrofização pelo seu tempo de criação, antes de chegar no reservatório Poções, e possivelmente, fazendo com que os processos de deposição, prevalecessem sobre o de transporte, ao longo do percurso da água.

Nos reservatórios sucessivos, a água que saiu do reservatório Poções passou por trechos intermitentes do rio Paraíba, antes de entrar nos reservatórios, atuando como depósitos de matéria orgânica e inorgânica, provenientes de folhas de vegetações ciliares e sedimento seco, que pode ter se acumulado no período sem água, mas com a retomada do fluxo ocorreu transporte da matéria orgânica, nutrientes e plantas terrestres, predominando o processo de transporte sobre o de deposição (BARBOSA et al., 2021). Outro fator preponderante para aumento do fósforo nos reservatórios Camalaú e Epitácio Pessoa no Cenário 2 é a ressuspensão do sedimento nos períodos de aumento da vazão, disponibilizando nutrientes na coluna de água (ZENG et al., 2015).

De acordo com estudo de Tercini e Mélo Junior (2016), em trecho do rio Tietê, foi constatado que, para um reservatório exercer papel na melhoria da qualidade da água ao longo do rio, a operação do sistema deverá basear-se na manutenção de cotas elevadas e descargas baixas, a fim de permitir maior tempo de residência da água no reservatório para favorecer o processo de autodepuração da matéria orgânica. Além disso, a água deve ser transferida de modo mais uniforme possível para atenuar o impacto na qualidade da água nos trechos a jusante (ZENG et al., 2013).

Com isso, fica evidente que a gestão operacional das vazões do PISF no Eixo Leste, deverá ser pautada priorizando não somente a disponibilidade hídrica para atendimento às demandas, mas também a capacidade de resiliência do sistema. Os resultados dos cenários 1 e 2, mostram que a qualidade da água dos reservatórios estudados, sobretudo, para o abastecimento público, está atrelada a uma alocação otimizada da água e controle das vazões, uma vez que o volume de água dos reservatórios tem papel importante no potencial de autodepuração desses corpos hídricos.

A introdução das águas do PISF na bacia do rio Paraíba também deve estar associada a ações de manejo como tratamento de esgoto e efluentes e a gestão eficiente do uso e ocupação do solo e dos recursos hídricos, buscando mecanismos para evitar as perdas no sistema e prudência no processo de alocação de água, para garantir segurança hídrica, águas de qualidade adequada para seu uso e consequente melhoria na qualidade de vida da população beneficiada.

Foi possível observar com os cenários simulados que a transferência de águas do rio São Francisco por um período de 50 anos, considerando a média das vazões que vem sendo aplicadas, é capaz de influenciar positivamente a redução de parâmetros da qualidade das águas no Alto Curso do rio Paraíba, sobretudo nos trechos a partir da montante do reservatório Epitácio Pessoa, com exceção do fósforo total no reservatório Epitácio Pessoa, a jusante dele e a jusante do reservatório Poções.

A redução nas concentrações nem sempre foi suficiente para contribuir com a melhoria da qualidade da água, dentro dos padrões normatizados. A análise dos cenários estudados é uma avaliação estratégica que permite observar, dentro de um patamar médio das condições trabalhadas para a bacia, como pode se comportar a qualidade da água nos próximos 50 anos, caso se mantenha o padrão de vazões que vem sendo aplicado pelo PISF.

4.4.2.2 Cenários: 3 – vazão real e 4 – vazão máxima

A análise dos dois cenários 3 e 4, considerando a vazão real transposta para o rio Paraíba (cenário 3) e a vazão máxima de $10 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, prevista para trabalhar em condições ótimas pelo Projeto (cenário 4), mostrou que as concentrações de DBO diminuíram a partir do trecho a jusante do reservatório Camalaú (Q71) com aumento da vazão (cenário 4), em relação ao cenário 3 (Figura 61).

No reservatório Poções, quando verificados os trechos que atendem à Resolução Conama 357/05 (BRASIL, 2005), pode-se observar que apenas este reservatório não atendeu aos requisitos mínimos para águas de classe 2, permanecendo com concentrações superiores a $5,0 \text{ mg L}^{-1}$ em ambos os cenários. Porém, no cenário 4, a DBO estabilizou com valor médio de $5,8 \text{ mg L}^{-1}$.

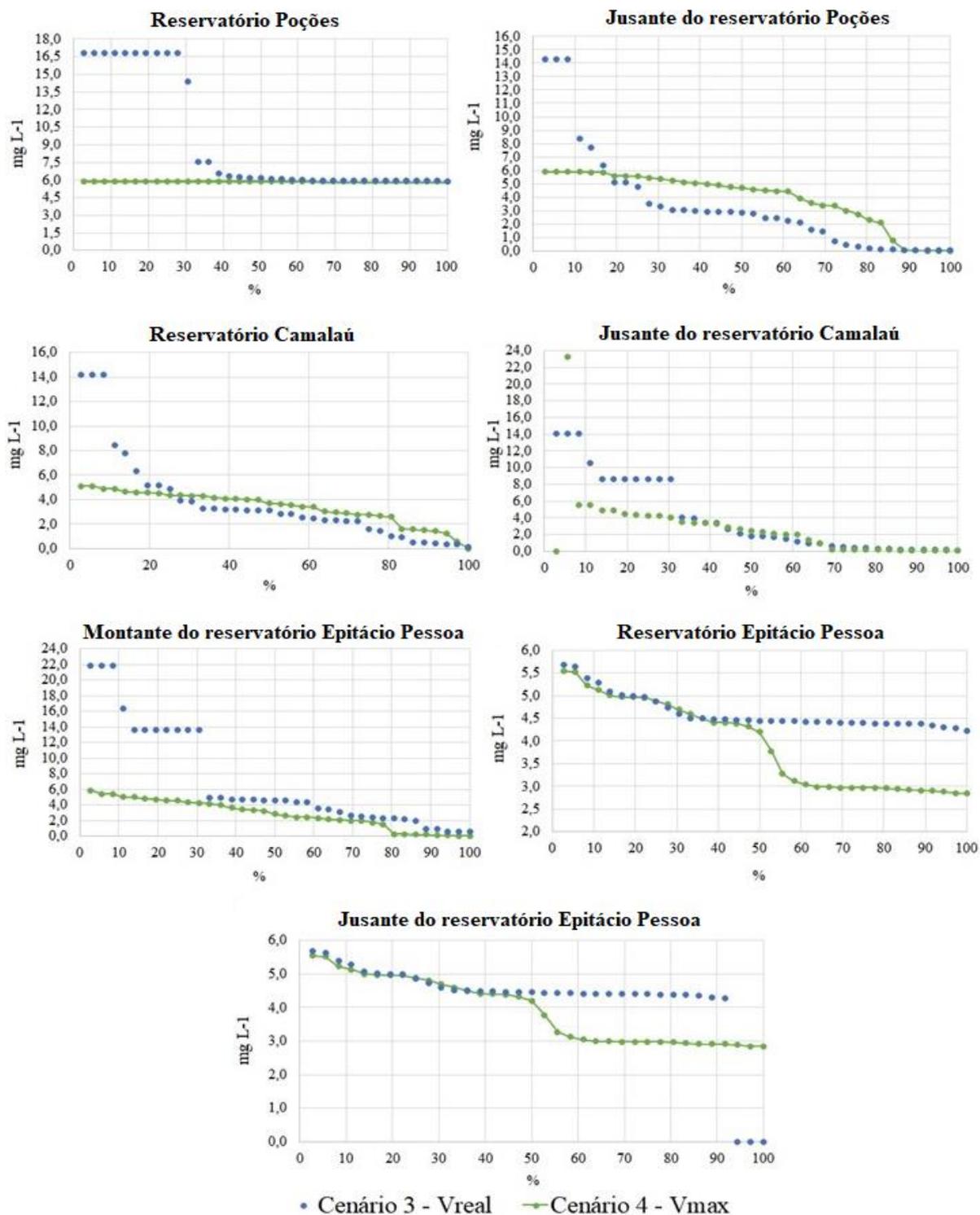
No trecho a jusante do reservatório Poções (Q69) e no reservatório Camalaú (Q70), as concentrações foram superiores no cenário 4, na maior parte do tempo de estudo. A permanência de concentrações mais elevadas nesses trechos pode estar relacionada ao aumento no aporte da descarga do reservatório Poções, e conseqüentemente mexido com o sedimento e disponibilizando maior carga orgânica e nutrientes na água. As águas que permanecem no reservatório Camalaú, com maior tempo de residência por ser um trecho lântico, voltam a estabilizar-se ao longo do rio (BARBOSA et al., 2021; CAVALCANTE et al., 2021).

Excepcionalmente, no trecho a jusante do reservatório Poções foi observado maior atendimento à legislação no cenário 3 (75% do período), em relação ao cenário 4, que atendeu ao limite em 55%.

Nos trechos lóticos/intermediários a jusante do reservatório Camalaú, o cenário 3 apresentou-se em 67% do tempo com concentrações dentro dos padrões, enquanto no cenário 4, permaneceu em 86% do tempo. A montante do reservatório Eptácio Pessoa, o cenário 3 exibiu valores da DBO abaixo de $5,0 \text{ mg L}^{-1}$ em 64% do tempo no cenário 3, enquanto no cenário 4 permaneceu em 86% do tempo. A jusante do reservatório Eptácio Pessoa, em ambos

os cenários, as concentrações permaneceram por 85% do período dentro dos padrões recomendados pela legislação.

Figura 61 - Curva de permanência da DBO, no Alto Curso do Rio Paraíba, no período de 2017 a 2019, com cenário 3 – simulado com as vazões reais de entrada para as águas do PISF; e cenário 4 – com vazão constante de $10 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$



Fonte: A autora (2021).

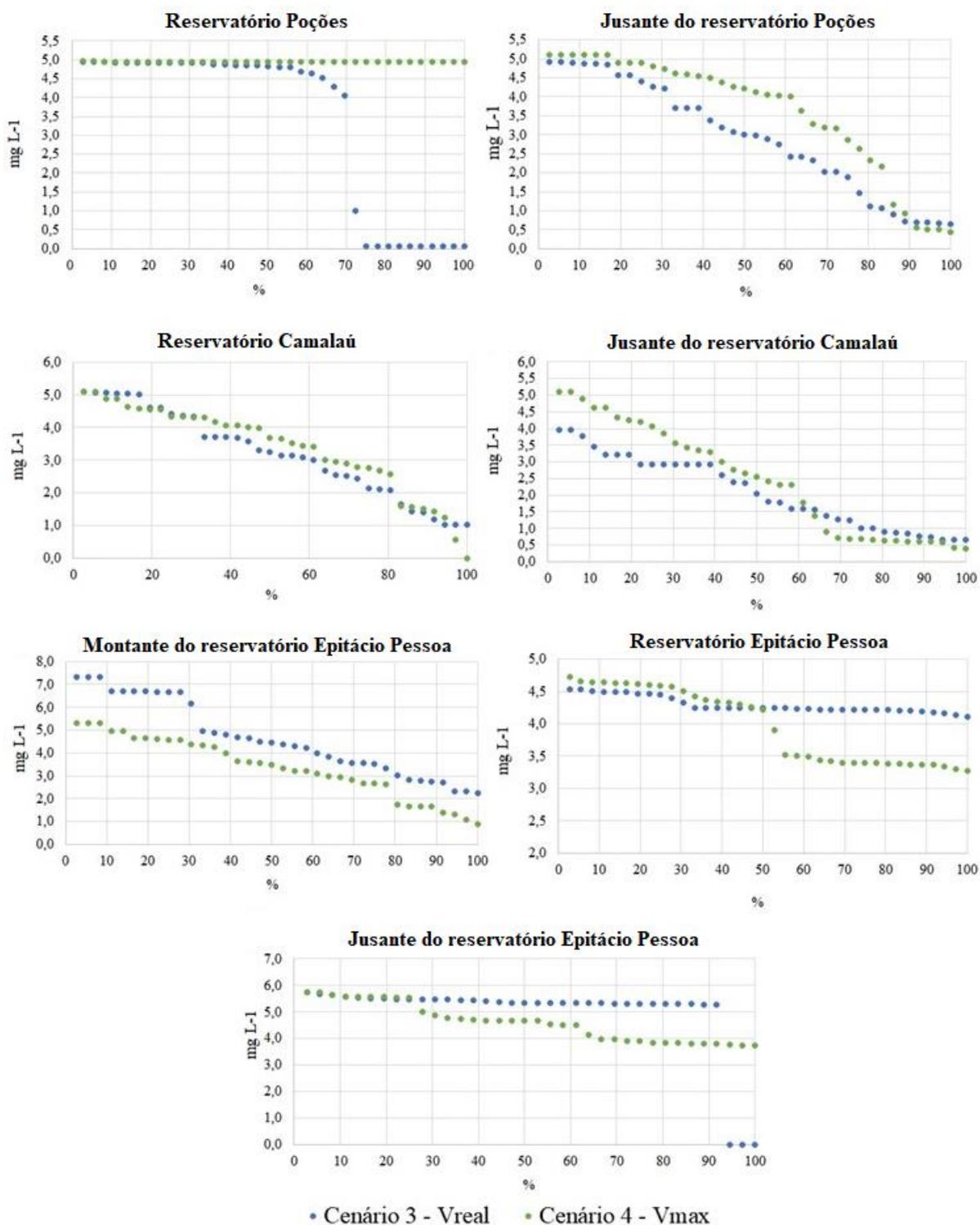
Nos reservatórios Camalaú e Eptácio Pessoa, foram identificadas concentrações dentro dos padrões exigidos pela legislação em 75% do tempo no cenário 3. No cenário 4, a DBO atendeu à Resolução Conama 357/05, em 93% do tempo, no reservatório Camalaú (Q70), e em 85% do tempo no reservatório Eptácio Pessoa (Q73).

As simulações do OD, nos cenários 3 e 4, exibiram concentrações limítrofes ao longo do Alto Curso do rio Paraíba (Figura 62). O trecho que apresentou valores mais elevados foi a montante do reservatório Eptácio Pessoa (cenário 3). No entanto assim como os demais, na maior parte do período estudado, apresentou concentrações abaixo do limite mínimo de 5,0 mg L⁻¹ para água de classe 2. Com exceção do reservatório Poções no cenário 4, com 100% do período apresentando valores dentro dos limites exigidos e a jusante do reservatório Eptácio Pessoa, no cenário 3, com 92% do período exibindo valores dentro do preconizado.

Os trechos com maior elevação das concentrações de OD no cenário 4, quando comparado ao cenário 3, foi entre o reservatório Poções e a jusante do reservatório Camalaú. Nos trechos seguintes, a partir da montante do reservatório Eptácio Pessoa, o OD foi mais elevado, na maior parte do período, no cenário 3.

Quando verificados o atendimento à Resolução Conama 357/05 (BRASIL, 2005), pode-se observar que no cenário 4, foi maior a ocorrência de concentrações de OD que atenderam os requisitos mínimos para águas de classe 2, nos reservatórios Poções e nos trechos a jusante deste e do reservatório Camalaú.

Figura 62 - Curva de permanência do OD, no Alto Curso do Rio Paraíba, no período de 2017 a 2019, com cenário 3 – simulado com as vazões reais de entrada para as águas do PISF; e cenário 4 – com vazão constante de $10 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$



Fonte: A autora (2021).

O fósforo total apresentou-se ao longo da área de estudo com valores mais elevados no cenário 4, quando comparado ao cenário 3, com exceção do reservatório Poções e do trecho a montante do reservatório Eptácio Pessoa (Figura 63). Nos reservatórios Poções e Eptácio Pessoa, e trecho a jusante deste último, na maior parte do tempo em ambos os cenários, o fósforo total esteve acima dos limites recomendados pela Resolução Conama 357/05 para ambientes lênticos e intermediários, classe 2 (BRASIL, 2005).

O atendimento aos índices de qualidade da água foi observado nos trechos a jusante do reservatório Poções, em 28% do tempo no cenário 3 e 14% no cenário 4; no reservatório Camalaú, com 22% do tempo no cenário 3 e 3% no cenário 4; a jusante do reservatório Camalaú, em 50% do tempo no cenário 3 e 33% no cenário 4; e a montante do reservatório Eptácio Pessoa, com 53% no cenário 3 e 39% no cenário 4 (Figura 63).

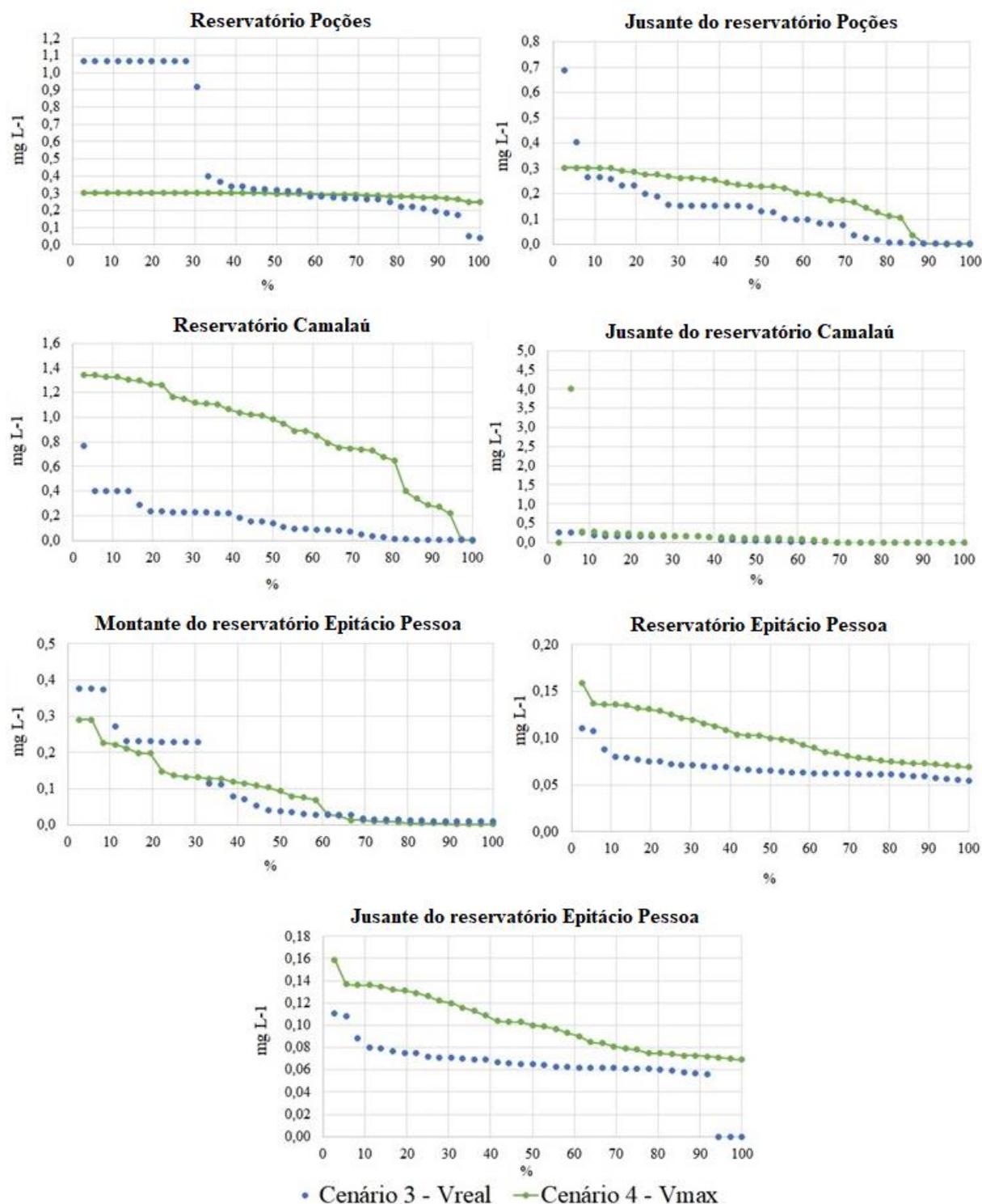
De acordo com os autores Barbosa et al. (2021), do mesmo modo como a influência das chuvas, o aumento da vazão na bacia do rio Paraíba com a chegada das águas do rio São Francisco, levou ao aumento no escoamento e transporte do sedimento, nutrientes e matéria orgânica no rio, e deposição nos reservatórios, que estavam desconectados hidrológicamente devido ao período prolongado de estiagem desde 2012, que secou os trechos lóticos e intermitentes na bacia. Em geral, rios intermitentes com presença de barramentos, como os reservatórios de água, são formados por diferentes ambientes, com trechos lóticos, lênticos e terrestres em redes fluviais, e os reservatórios dependentes dos ciclos hidrológicos para manter uma conectividade com o rio (BARBOSA et al., 2012; BARBOSA et al., 2021).

Com base nisso, os valores mais elevados do fósforo total, mesmo com aumento da vazão (cenário 4) em alguns trechos, podem estar relacionados a fatores como: os trechos lóticos que antes estavam secos durante o longo período de estiagem, se tornaram depósitos de matéria orgânica e inorgânica, que em seguida foi carregada mais intensamente ao longo do rio, com a retomada do fluxo de água após início da operação do PISF (ZENG et al, 2015; BARBOSA et al., 2021; CAVALCANTE et al., 2021). No caso do cenário 4, a ocorrência de uma vazão maior em curto período, disponibilizou os nutrientes na água, sem obter tempo suficiente para promover a autorregulação do corpo hídrico.

Nutrientes, como o fósforo, seguem diluindo-se no curso do rio, com as descargas dos reservatórios ou permanecendo naqueles reservatórios que possuem tempo de residência da água mais elevado, como é o caso dos reservatórios Camalaú e Eptácio Pessoa. Além disso, outro fator, já mencionado anteriormente, é a liberação interna do sedimento nos reservatórios, que com aumento da vazão no Cenário 4, possivelmente levou a maior ressuspensão de nutrientes na água. Estudo de Zeng et al. (2015), em projeto de transposição de águas na China,

observou aumento nas concentrações de fósforo e nitrogênio na água e associou o processo de ressuspensão do sedimento como principal fonte causadora.

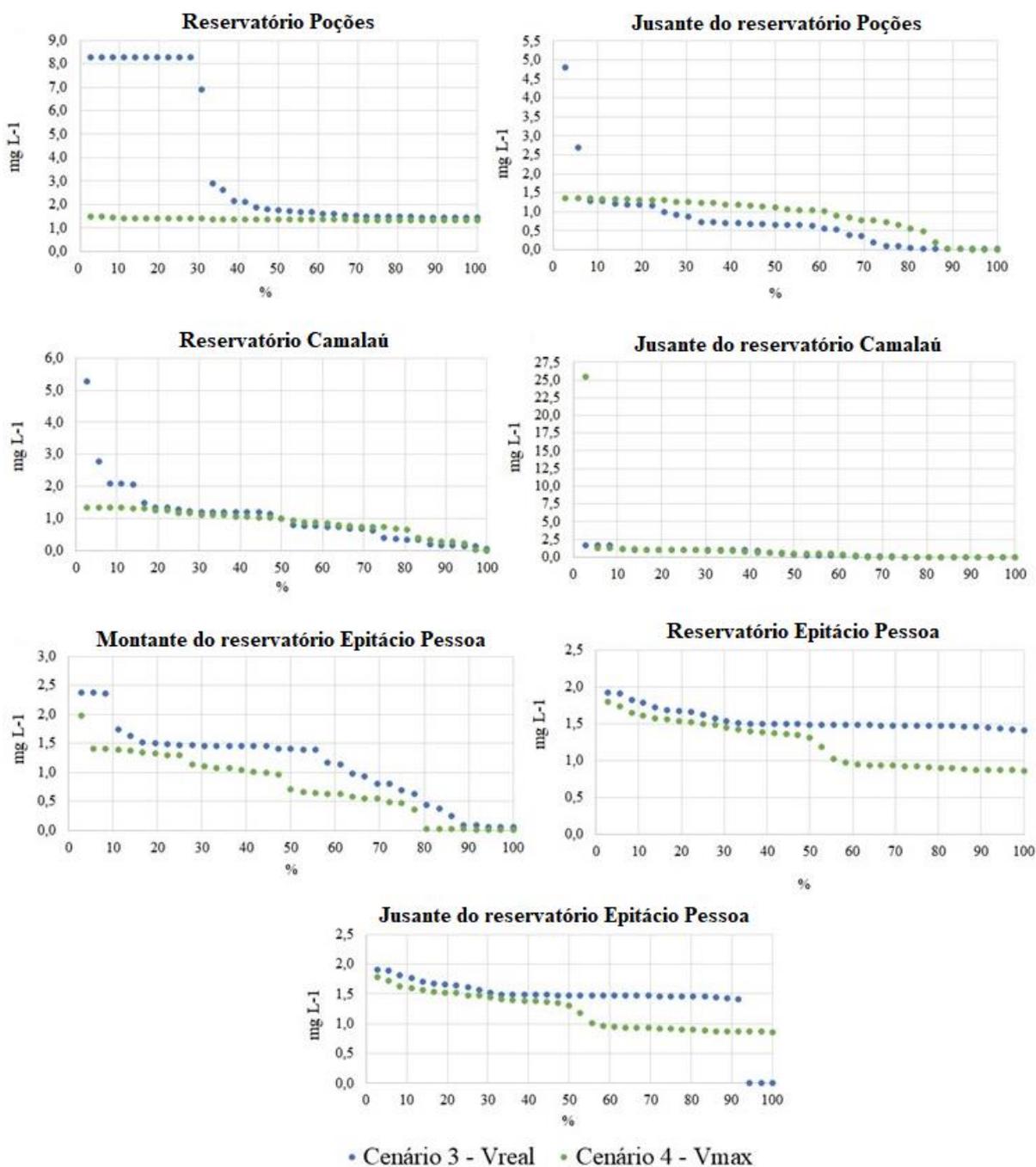
Figura 63 - Curva de permanência do fósforo total, no Alto Curso do Rio Paraíba, no período de 2017 a 2019, com cenário 3 – simulado com as vazões reais de entrada para as águas do PISF; e cenário 4 – com vazão constante de $10 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$



Fonte: A autora (2021).

O nitrogênio amoniacal total apresentou-se inversamente ao fósforo total, com maiores concentrações no cenário 3, em relação ao cenário 4, com exceção do trecho compreendido entre a jusante do reservatório Poções (Q69) e a jusante do reservatório Camalaú (Q71) (Figura 64).

Figura 64 - Curva de permanência do nitrogênio amoniacal total, no Alto Curso do Rio Paraíba, no período de 2017 a 2019, com cenário 3 – simulado com as vazões reais de entrada para as águas do PISF; e cenário 4 – com vazão constante de $10 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$



Fonte: A autora (2021).

A ocorrência de baixas concentrações de nitrogênio podem estar relacionadas às altas temperaturas na região de estudo, que aceleram o processo de desnitrificação, ao pH, que de acordo com dados analisados do monitoramento da qualidade da água, se apresentaram numa faixa média de 7,0 a 8,3, nos anos de 2017 a 2019, com tendência mais alcalina (GOMES et al., 2016) e a presença de macrófitas aquáticas (PÔMPEO, 2008).

No cenário 4, todos os trechos estudados apresentaram concentrações de nitrogênio abaixo do limite máximo de $3,7 \text{ mg L}^{-1}$, exigido pela Resolução Conama 357/05, para águas de classe 2, com exceção do trecho a jusante do reservatório Camalaú, que em 3% do período apresentou concentrações fora do recomendado (BRASIL, 2005). No cenário 3, o atendimento à legislação de forma integral, só pode ser observado a partir do trecho a jusante do reservatório Camalaú (Figura 64).

A comparação entre os cenários 3 e 4, mostrou maior atendimento à Resolução Conama 357/05, para águas de classe 2 (BRASIL, 2005), no cenário 4, para os parâmetros DBO e nitrogênio total, e o OD, no reservatório Poções e nos trechos a jusante deste e do reservatório Camalaú.

Com as recentes cheias na região do Alto São Francisco, o aporte no volume dos reservatórios da bacia do rio São Francisco se intensificou, chegando ao aumento da vazão de $816 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ em 10 de janeiro de 2022 para $4.000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ em 24 de janeiro de 2022, e o volume útil chegando a 100% em 31 de março deste ano, condições não observadas desde 2009 (CHESF, 2022).

Este evento favorável na bacia do rio São Francisco pode contribuir com aumento da vazão para os reservatórios do Eixo Leste do PISF, e com isso, o aumento das outorgas liberadas. Como observado na Tabela 2, descrita no subcapítulo 4.3, a emissão de novas outorgas após o início de operação do PISF, já vem acontecendo nos reservatórios de estudo, sobretudo para aquicultura.

Estudos mostram que em outros reservatórios no semiárido nordestino, como o de Itaparica (BA/PE), a aquicultura por meio de piscicultura de tanque-rede e viveiro escavado vêm contribuindo para aumento da eutrofização do reservatório, além de ter evidenciado que o efluente de viveiros possui efeito ecotoxicológico, apresentando riscos à biota aquática (CARDOSO et al, 2017c; MARQUES et al., 2018; CARDOSO et al, 2019).

O uso das águas do PISF para diluição dos nutrientes na bacia do rio Paraíba, sem estar associado a ações preventivas e de manejo dos lançamentos gerados, e a alocação de água otimizada, não é capaz de elevar a qualidade da água a patamares ótimos e manter os parâmetros

importantes, como o fósforo total, dentro dos limites estabelecidos pela legislação brasileira (BRASIL, 2005).

4.5 DESAFIOS PARA SUSTENTABILIDADE DA ALOCAÇÃO E QUALIDADE DE ÁGUA EM TRECHO DO EIXO LESTE DO PISF

No Brasil, eventos relacionados a desastres naturais oriundos da seca, registraram aumento de mais de 100%, e a quantidade média anual da população afetada aumentou mais de 400%, quando comparados dados do período de 1991/2012 a 2013/2016. O Estado da Paraíba está entre os três mais suscetíveis à ocorrência de períodos de estiagem, com prioridade de investimento para minimização dos efeitos das secas, e as seguintes áreas sendo destacadas como preponderantes: mapeamento, prevenção, monitoramento e alerta (SOUZA; OLIVEIRA, 2019).

Pavão e Nascimento (2019) destacam que os órgãos responsáveis pela gestão das águas, possuem uma atuação incipiente quanto aos apontamentos e diretrizes que possam oferecer suporte ao enfrentamento de crises, contribuindo para a ausência de planejamento adequado e dos conflitos pelo usos múltiplos da água.

Na crise hídrica mais recente (2012 a 2016) no Alto Curso do rio Paraíba, as principais medidas de gestão estiveram relacionadas à limitação na liberação de outorgas nos reservatórios, sobretudo no reservatório Eptácio Pessoa, ocorrendo de forma tardia, dois anos após o começo do período de estiagem (LUCENA, 2018). A Tabela 22 traz as medidas realizadas pela AESA, com relação à alocação de água de 2014 a 2016.

Tabela 22 – Medidas de gestão para enfrentamento à crise hídrica no reservatório Eptácio Pessoa de 2014 a 2016

Medidas	Período	Volume do reservatório (%)	Vazão retirada (m³s⁻¹)	Horas por semana sem água
Suspensão da irrigação	Jul/2014	29,8	1,5	–
1º racionamento no abastecimento	Dez/2014	23,9	1,35	36
2º racionamento no abastecimento	Jun/2015	18,9	1,08	60
3º racionamento no abastecimento	Out/2015	14,2	0,88	84
4º racionamento no abastecimento	Jul/2016	8,2	0,65	112

Fonte: Adaptado de Lucena (2018).

De acordo com Morais et al. (2020), os conflitos pelos usos da água na bacia do rio Paraíba se apresentam como desafios para a gestão de recursos hídricos, tanto nos períodos de escassez hídrica, como após o início da operação do Eixo Leste do PISF. Com a chegada das águas do rio São Francisco, aumentam também as demandas e o desenvolvimento de atividades econômicas que utilizam a água.

Os cenários de alocação de água simulados nesta pesquisa mostram, que mesmo com a chegada das águas do PISF, há necessidade de cautela na emissão de novas outorgas para garantia sustentável dos usos múltiplos e da qualidade da água. Com base nos resultados observados, com intuito de auxiliar na operação otimizada do sistema, recomenda-se:

- Emissão de novas outorgas com prazo de vigência anual;
- Renovação das outorgas concedidas a partir de estudos realizados considerando as condições hidrológicas, volumes, vazões e qualidade da água.

- Aumento das estações fluviométricas nas bacias integrantes do PISF. O Alto Curso do rio Paraíba conta apenas com três estações. E melhoria da qualidade da informação, oferecendo dados consistentes e reduzindo as falhas, tanto para os dados de vazão, como os pluviométricos.

- Desenvolvimento de um Sistema de Suporte à Decisão: para agregar dados e informações das bacias integrantes do projeto, dispor de modelos de análise para projeção de vazões e a alocação de água no horizonte futuro e otimizar a operação do sistema, visando a eficiência do uso dos recursos hídricos e a redução de conflitos pelos usos múltiplos da água.

O Sistema de Suporte à Decisão deverá facilitar o acesso e a troca de informações entre o Operador Federal e os Operadores Estaduais, melhorar a sinergia das ações, aumentar os benefícios econômicos, promover boas práticas de governança e, especialmente, criar um banco de dados integrado entre todos os estados envolvidos, trazendo informações quantitativas como qualitativas.

Associado ao controle da alocação de água, a qualidade é um fator que deve ser monitorado sistematicamente, pois a oferta de água depende tanto da alocação otimizada deste recurso, quanto para atendimento aos padrões de potabilidade. Os problemas recorrentes da eutrofização das águas, além de limitarem a disponibilidade de água potável, elevam o custo do tratamento da água e contribuem para a degradação do ecossistema aquático.

A integração das águas da bacia do rio São Francisco com as bacias do Nordeste Setentrional traz impactos positivos e negativos nos corpos hídricos envolvidos. Entre os programas do monitoramento estabelecidos como condicionantes das licenças de instalação e de operação deste empreendimento, o PBA 22 - Monitoramento da Qualidade da Água e Limnologia é uma importante ferramenta para diagnóstico da qualidade das águas nas bacias

integrantes do PISF. Os objetivos do PBA 22 são aprofundar o conhecimento, acompanhar a evolução da qualidade da água dos rios e reservatórios receptores das águas do PISF e especificar as situações que apresentam risco para a saúde humana e animal (BRASIL, 2022).

O monitoramento da qualidade da água em trecho do Eixo Leste, no Alto Curso do rio Paraíba, mostra que, a água se encontra muitas vezes eutrofizada, apresentando parâmetros fora dos limites preconizados pela legislação brasileira, com destaque para o fósforo total e para altas densidades de Cyanobacteria, em reservatórios de abastecimento público. As informações do monitoramento contribuem no diagnóstico das condições ambientais. No entanto, alguns pontos precisam ser discutidos, a fim de proporcionar melhorias que permitam uma análise mais fidedigna das bacias integrantes do Projeto.

As propostas de melhorias estão pontuadas a seguir:

- Acréscimo de pontos de amostragem: atualmente possuem apenas 10 pontos amostrais ao longo da bacia do rio Paraíba. É necessário abranger os pontos de captação de água para abastecimento público, lançamento de efluentes e as áreas de abrangência das atividades de agricultura irrigada e aquicultura.

- Diminuição do tempo entre as amostragens: realizada semestralmente, com indicação de realização no mínimo bimestral.

- Realização de amostragens complementares após os períodos de grande estiagem ou aumento das vazões.

- Continuação das análises nictemerais, que ocorreram apenas no período de instalação do Projeto. A partir desse tipo de análise é possível observar as variações que acontecem no ecossistema aquático ao longo do dia, particularmente importantes para estudar eventos de curta duração (CARVALHO et al., 2016), permitindo entender melhor a dinâmica de organismos como o fitoplâncton e o zooplâncton no ambiente, além das interações entre os parâmetros físico-químicos na coluna de água.

Como observado no presente estudo, a carência de dados referentes aos corpos hídricos, tais como lançamentos de esgoto e efluentes, informações mais representativas sobre a qualidade da água, acompanhando das vazões naturais nos rios, entre outros, interferem negativamente no andamento dos estudos sobre alocação dos recursos hídricos e qualidade da água em bacias hidrográficas, e conseqüentemente na governança da água.

Associada aos impactos no ecossistema aquático, ressalta-se outra problemática que vem sendo estudada, a introdução de espécies exóticas em projetos de integração de bacias (CARDOSO et al., 2017b, c; 2019). Como relatado no subcapítulo 4.2.2, foi verificada a ocorrência de espécies exóticas de dinoflagelados, *C. furcoides* e *C. hirundinella*, a partir de

2018, após o início da operação do PISF. Outros organismos aquáticos exóticos também foram observados na área de estudo, na pesquisa de Ramos et al. (2021), foi relatada ocorrência da espécie exótica da ictiofauna, o *Moenkhausia costae* no reservatório Poções, sugerindo que tenha chegado no rio Paraíba a partir das águas do PISF (RAMOS et al., 2021).

A continuidade do monitoramento ambiental é imprescindível para realizar estudos de sucessão ecológica, considerando as mudanças climáticas e a identificação das espécies bioindicadoras e dominantes. Os resultados desta pesquisa servem como alerta quanto à necessidade de medidas de manejo nos reservatórios, com captação de água para consumo humano e dessedentação animal e da permanência do monitoramento ambiental.

A poluição das águas deve ser observada de maneira integrada com as regiões de abrangência do PISF. Os sistemas de tratamento dos esgotos domésticos nas bacias integrantes do Eixo Leste são deficitários (PORTELA, 2021). Os lançamento de esgotos e das atividades agrícolas estão entre as principais fontes poluidoras responsáveis por contribuir com acréscimo de nutrientes na água (LIMA et al., 2018).

Os despejos agrícolas, com uso da irrigação sem devido manejo e a intensificação da utilização de agrotóxicos, contribuem para aumento das concentrações do fósforo e nitrogênio nos corpos hídricos e elevam o risco de eutrofização dos reservatórios (ARRUDA, 2015; CUNHA et al., 2019; WU et al, 2021). Com isso, é necessário o monitoramento e manejo da água de drenagem agrícola.

Com base na pesquisa desenvolvida por Arruda (2015), boas práticas agrícolas em perímetros irrigados, para o uso sustentável da água e redução do aporte de fósforo nos corpos hídricos receptores, são sugeridas:

- Utilização de adubos orgânicos e biofertilizantes.
- Reciclagem de resíduos agrícolas.
- Uso racional da água nos perímetros irrigados.
- Análises sistemáticas do solo e balanço de nutrientes.
- Cursos de aperfeiçoamento sobre fertilização do solo, dinâmica solo-nutriente-plantas, permeabilidade e deterioração.
- Aplicação controlada de fertilizantes.
- Controle e manejo das águas de drenagem agrícola.
- Revitalização das matas ciliares, atuando como barreiras vegetais.

Diante de tantos desafios observados, propostas foram formuladas e sintetizadas, a fim de contribuir para melhoria da gestão dos recursos hídricos no Alto Curso do rio Paraíba, Eixo Leste do PISF (Quadro 4).

Quadro 4 – Recomendações para as instituições que participam da gestão dos recursos hídricos no Alto Curso do Rio Paraíba e no Eixo Leste do PISF

DESAFIOS	RECOMENDAÇÕES	INSTITUIÇÕES
Gestão sustentável da água	Desenvolvimento de um Sistema de Suporte à Decisão integrado e um banco de dados único para o PISF.	Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR)
	Promoção de maior integração entre os Estados e órgãos atuantes nas bacias participantes do Eixo Leste do PISF.	
	Fiscalização dos usos e dos usuários clandestinos das águas do PISF e implementar um plano de controle com medidas corretivas ou de apoio aos usuários carentes.	Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba (CODEVASF)
	Atuação no controle e restrição das áreas de acesso aos canais e reservatórios do PISF.	
	Identificação e proteção dos serviços ecossistêmicos oferecidos pela bacia do rio Paraíba.	Agência Executiva de Gestão das Águas (AESAs)
Monitoramento quantitativo da água	Atualização dos estudos de Enquadramento e do Plano Diretor da bacia do rio Paraíba.	
	Estudos sobre ações de prevenção às mudanças climáticas.	Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba (CBHRP)
	Promoção de ações de incentivo à sociedade civil na participação da gestão dos recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Paraíba.	
	Aplicação de programas de cooperação entre os usuários e as associações (pescadores, agricultores etc.) com intuito de sensibilizá-los para atuar como atores socioambientais locais para sustentabilidade dos recursos hídricos.	
Monitoramento quantitativo da água	Promoção de parcerias com as instituições de Ensino Superior para implementar programas de sensibilização ambiental com os diversos usuários na bacia.	Prefeituras dos municípios envolvidos
	Ampliação das Plataformas de Coleta de Dados (PCDs) para monitoramento das variáveis climáticas, favorecendo dados mais condizentes com a realidade e subsidiando as ações das instituições de controle e as pesquisas científicas.	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA)
	Estabelecimento de marco regulatório para o reúso da água, visando possibilitar seu emprego em determinados usos, com intuito de reduzir a demanda nos mananciais.	
	Atualização das curvas cota x área x volume dos reservatórios na bacia hidrográfica do rio Paraíba.	Departamento Nacional de Obras contra as Secas (DNOCS)

	Avaliação sistêmica das vazões solicitadas nos Planos Operativos do PISF.	Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba (CODEVASF)
	Ações para garantir eficiência no combate aos desperdícios de água no sistema.	Companhia de Águas e Esgotos da Paraíba (CAGEPA)
Monitoramento da qualidade da água	Manutenção e realização de melhorias no Programa de Monitoramento da Qualidade da água e Limnologia.	Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR)
	Desenvolvimento de normas de referência, trazendo indicadores e padrões específicos para qualidade da água que considerem as especificidades do semiárido. Competência atribuída à Agência pela Lei 14.026/20.	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA)
	Estabelecimento de metas para a manutenção dos índices de qualidade da água em atendimento ao enquadramento dos corpos hídricos na bacia hidrográfica do rio Paraíba.	Agência Executiva de Gestão das Águas (AES/A)
Controle do uso do solo	Fiscalização do uso e ocupação do solo no entorno dos rios e reservatórios na bacia hidrográfica do rio Paraíba.	Superintendência de Administração do Meio Ambiente da Paraíba (SUDEMA)
	Inspeções em empreendimentos potencialmente poluidores no entorno dos rios e reservatórios na bacia hidrográfica do rio Paraíba.	
	Emissão e controle do licenciamento ambiental dos reservatórios presentes na bacia hidrográfica do rio Paraíba.	
Controle de fontes poluidoras	Ações de monitoramento e controle dos lançamentos da atividade de aquicultura e dos perímetros irrigados, associadas ao emprego de boas práticas agrícolas e o manejo integrado de nutrientes.	Agência Executiva de Gestão das Águas (AES/A)
	Implantação de estações de tratamento de esgoto e efluentes.	Companhia de Águas e Esgotos da Paraíba (CAGEPA)
	Averiguação da presença de lançamentos de esgoto e efluentes próximos às captações de água, para se necessário, modificações das captações para montante dos principais lançamentos.	
	Realização de diagnóstico dos lançamentos de esgoto e efluentes clandestinos na bacia.	Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba (CBHRP)
	Implantação de Sistemas de Esgotamento Sanitário nos municípios localizados nas bacias envolvidas no PISF.	Prefeituras dos municípios envolvidos
	Implantação de sistemas de lagoas de estabilização para cidades de médio e pequeno	

porte, com reuso do efluente nas atividades agrícolas.

Fonte: A autora (2022).

Os desafios para gestão dos recursos hídricos no Eixo Leste do PISF são muitos, mas a constância de condutas sustentáveis e responsáveis podem garantir a permanência deste recurso para as próximas gerações e o uso prioritário para a população do semiárido beneficiada pelo projeto, sobretudo nos períodos de extremos climáticos. Diante disto, foram levantadas contribuições que o monitoramento ambiental e a aplicação de modelos quali-quantitativos da água no Eixo Leste do PISF, fornecem para atendimento das seguintes metas do ODS 6, que faz parte da agenda norteadora das principais ações voltadas à sustentabilidade nos últimos tempos (ONU, 2015):

Meta 6.3 - Até 2030, melhorar a qualidade da água nos corpos hídricos, reduzindo a poluição, eliminando despejos e minimizando o lançamento de materiais e substâncias perigosas, reduzindo pela metade a proporção do lançamento de efluentes não tratados e aumentando substancialmente o reciclo e reuso seguro localmente.

- *Indicadores:*

6.3.1 - Proporção de águas residuais tratadas de forma segura.

6.3.2 - Proporção de corpos hídricos com boa qualidade ambiental.

- *Contribuições da pesquisa:* Informações sobre a qualidade da água dos corpos hídricos em estudo, trazendo dados físico-químicos e biológicos, índices de classificação dos corpos hídricos, tendências dos possíveis impactos na qualidade das águas por meio de modelagem e impactos dos lançamentos de esgoto e efluentes nos corpos de água. Esses dados têm como objetivo subsidiar ações voltadas à promoção de melhoria da qualidade da água e sustentabilidade dos corpos hídricos.

Meta 6.4 - Até 2030, aumentar substancialmente a eficiência do uso da água em todos os setores, assegurando retiradas sustentáveis e o abastecimento de água doce para reduzir substancialmente o número de pessoas que sofrem com a escassez.

- *Indicadores:*

6.4.1 - Alteração da eficiência no uso da água ao longo do tempo.

6.4.2 - Nível de stress hídrico: proporção das retiradas de água doce em relação ao total dos recursos de água doce disponíveis.

- *Contribuições da pesquisa:* Informações sobre os usos da água, os impactos do gerenciamento da alocação de água e simulações considerando a relação entre diferentes vazões e atendimento às demandas, por meio da aplicação de modelo matemático.

Meta 6.5 - Até 2030, implementar a gestão integrada dos recursos hídricos em todos os níveis de governo, inclusive via cooperação transfronteiriça.

- *Indicadores:*
 - 6.5.1 - Grau de implementação da gestão integrada de recursos hídricos (0-100).
 - 6.5.2 - Proporção das áreas de bacias hidrográficas transfronteiriças abrangidas por um acordo operacional para cooperação hídrica.
- *Contribuições da pesquisa:* Informações que subsidiam o desenvolvimento de uma gestão integrada no Eixo Leste do PISF, trazendo propostas para promoção de um Sistema de Suporte à Decisão na área em estudo.

Meta 6.6 - Até 2020, proteger e restaurar ecossistemas relacionados com a água, incluindo montanhas, florestas, zonas úmidas, rios, aquíferos e lagos, reduzindo os impactos da ação humana.

- *Indicadores:*
 - 6.6.1 - Alteração na extensão dos ecossistemas relacionados à água ao longo do tempo.
- *Contribuições da pesquisa:* Informações sobre diagnóstico ambiental da região do Alto Curso do rio Paraíba, mostrando as alterações ocorridas nos últimos nove anos, através de monitoramento da qualidade da água, por meio de indicadores certificados pela legislação brasileira. Esses elementos podem subsidiar o manejo nas áreas impactadas negativamente, assim como a conservação dos ambientes preservados.

Essas informações dão subsídio às ações que contribuíram para implementação do ODS 6 dos 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável da ONU. É necessário alcançar as metas para oferta de água com qualidade, atendimento eficiente às demandas prioritárias, reduzir o déficit quanto ao esgotamento sanitário, minimizar as lacunas na questão das informações disponíveis sobre os recursos hídricos em geral, ampliar os investimentos em tecnologias e infraestrutura hídrica e fomentar a formulação de políticas públicas que considerem as especificadas locais e o cumprimento das que já existem.

Esses resultados também podem contribuir, de forma secundária, para implementação de outros ODS, tais como: ODS 1 – Erradicação da pobreza; ODS 2 – Fome zero e agricultura sustentável; ODS 3 – Saúde e bem-estar; ODS 12 – Consumo e produção sustentáveis e o ODS 17 - Parcerias e meios de implementação.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Nesta seção serão apresentadas as conclusões referentes à alocação e qualidade da água no Alto Curso do rio Paraíba, Eixo Leste do PISF e as recomendações para futuros trabalhos.

5.1 CONCLUSÕES

Os principais usos da água identificados no Alto Curso do rio Paraíba são o abastecimento público (prioritário) e a irrigação; seguido por outros usos como aquicultura e industrial, e usos não consuntivos, como a pesca artesanal e a recreação. Os usos não prioritários vêm ganhando espaço e estes precisam ser continuamente revisados com cautela, uma vez que exercem pressão sobre os recursos hídricos, seja pela quantidade retirada como pelo impacto na qualidade da água, proveniente dos resíduos gerados e que voltam aos corpos hídricos, bem como pelo uso e ocupação do solo no entorno da bacia.

O instrumento da outorga é importante no controle e na gestão dos recursos hídricos no semiárido, este vem delimitando a quantidade de águas destinadas ao abastecimento público e aos demais usos, sendo amparado pela Legislação local. Para irrigação o arcabouço normativo criado em conjunto entre a ANA e a AESA, limita o espaço das áreas irrigadas, as vazões de retirada e incentiva o uso de sistemas de irrigação mais eficientes. No entanto, pode-se observar ocorrência de cultivos agrícolas fora dos padrões exigidos pela legislação. Assim como, o controle precário das vazões, sem um diagnóstico real da quantidade retirada, com ocorrência de usos clandestinos.

As condições hidrológicas e as mudanças climáticas as quais a bacia do rio Paraíba enfrentou (2012 – 2016), levou a longos períodos de estiagem e diminuição do volume de água armazenada nos reservatórios, associada à condição precária do esgotamento sanitário na região, tem exercido impactos diretos na qualidade da água.

A análise do monitoramento físico-químico da água, no período de 2011 a 2019, revelou que o fósforo total, a clorofila- α , os SDT, os coliformes termotolerantes, a turbidez, o OD e a DBO, excederam os limites recomendados pela Resolução Conama 357/05, para corpos de água classe 2, com destaque para o fósforo total e a DBO, que ultrapassaram os limites exigidos pela legislação em todos os sete pontos de amostragem ao longo do monitoramento. Os sólidos totais dissolvidos (SDT) só atendeu ao limite exigido nos pontos a jusante do reservatórios Poções (Q69) e a montante do reservatório Epitácio Pessoa (Q72). Com a chegada das águas do Rio São Francisco pode-se observar uma redução nas concentração do fósforo total, clorofila- α ,

DBO e SDT, mas apenas os SDT chegaram a apresentar concentrações abaixo do limite máximo preconizados pela Resolução Conama 357/05.

Os resultados do IQA apresentaram a classificação ruim entre os anos de estiagem (2013 a 2015), sobretudo, no reservatório Poções e no trecho a jusante do reservatório Epitácio Pessoa, mas o maior percentual foi de águas classificadas como boa (55%) a regular (30%). O IET foi mais crítico nos anos de 2014 a 2016, com maiores percentuais entre as categorias eutrófico (31%) e mesotrófico (22%), evidenciando o reservatório Poções e os trechos a jusante dos reservatórios Camalaú e Epitácio Pessoa. Em geral, os reservatórios Camalaú e Epitácio Pessoa apresentaram melhores condições de qualidade da água e níveis de trofia na área de estudo, o que pode estar relacionado à maior quantidade de água e à perenização dos reservatórios quando comparados a outros trechos.

A análise do fitoplâncton registou padrões típicos de rios e reservatórios do semiárido nordestino com influência antrópica, exibindo eventos de florações de Cyanobacteria e predominância deste grupo em relação aos demais, com destaque para reservatórios de abastecimento público. Também foram observadas ocorrência de espécies potencialmente produtoras de cianotoxinas, representando risco à saúde pública, além de episódios com densidade de Cyanobacteria acima do recomendado pela legislação brasileira, e a introdução de espécies exóticas de dinoflagelado, após chegada das águas do rio São Francisco na bacia do rio Paraíba.

O monitoramento das condições físico-químicas e biológicas associado às ferramentas computacionais, como os modelos matemáticos, traz uma visão mais fidedigna da dinâmica aquática, apresentando tendências, pois as análises de bioindicadores da qualidade da água isoladamente, de forma pontual, mostram apenas um retrato do ambiente, num espaço de tempo bastante específico.

Os cenários de atendimento às demandas revelaram que o abastecimento público proveniente das águas captadas no reservatório Poções e as demandas de irrigação no reservatório Epitácio Pessoa apresentaram déficits de atendimento nos cenários 1 – sem águas do PISF e 2 – com águas do PISF. Porém, no cenário 2 este déficit foi reduzido em 38% na simulação de atendimento ao abastecimento público e 14% na simulação de atendimento à irrigação. Representando aumento no percentual de atendimento a estas demandas no cenário 2 – com PISF.

O modelo conseguiu resolver o problema da alocação da água, nos períodos de seca de 2012 a 2016, sem comprometer o atendimento à demanda para o abastecimento público no

reservatório Epitácio Pessoa, mas para tal, às demandas de irrigação foram afetadas e o volume de água do reservatório poupado.

Comparando os cenários 3 – considerando vazões reais provenientes do PISF ao cenário 4 – considerando vazão de $10 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, nos 3 primeiros anos de operação do Projeto, pode-se observar aumento no percentual de atendimento às demandas de abastecimento público e irrigação no cenário 4, mas também foram observados déficits na entrega de água para atendimento às demandas em ambos os cenários. O déficit no abastecimento público reduziu de 61%, no cenário 3, para 8% no cenário 4, e para atendimento a irrigação, foi observada redução de 84%. no cenário 3. para 22%, no cenário 4.

O modelo priorizou a manutenção do atendimento ao abastecimento público e do volume de água seguro no reservatório Epitácio Pessoa. Observando os volumes de água ocorridos no reservatório Epitácio Pessoa, identifica-se que a prioridade dos gestores foi o atendimento a todas às demandas, mesmo que o volume deste viesse a atingir percentuais baixos, diferente das medidas adotadas na simulação.

Nos cenários de qualidade da água foram observadas diferentes condições entre os trechos estudados. Os trechos que mantiveram as concentrações mais elevadas ou com menor impacto positivo derivado da introdução das águas do PISF, foram entre o reservatório Poções e a jusante do reservatório Camalaú. No reservatório Epitácio Pessoa e a jusante dele, apenas o fósforo total permaneceu com concentrações mais elevadas no cenário 2 – com PISF.

No cenário 2, as concentrações tenderam a reduzir, estabilizar-se ou a manter, por maior período, com resultados dentro dos limites preconizados pela legislação. Com exceção da DBO, OD, PT e NT, no trecho a jusante do reservatório Poções, da DBO no reservatório Camalaú, do OD no trecho a montante do reservatório Epitácio Pessoa e do PT no reservatório Epitácio Pessoa e no trecho a jusante dele, os quais apresentaram resultados mais favoráveis quanto ao atendimento à legislação, no Cenário 1.

Foi possível observar com os cenários simulados que a transferência de águas do rio São Francisco, por um período de 50 anos, é capaz de influenciar a qualidade das águas do Alto Curso do rio Paraíba, mas esta alteração ocorreu de forma diferente nos trechos estudados e nem sempre a redução nas concentrações foi suficiente para contribuir com a melhoria da qualidade da água.

A comparação entre os cenários 3 (vazão trabalhada pelo PISF) e 4 (vazão máxima do Projeto), mostrou que as concentrações de DBO diminuíram a partir do trecho a jusante do reservatório Camalaú com aumento da vazão, já o OD aumentou suas concentrações no cenário 4, no reservatório Poções e a jusante dos reservatórios Poções e Camalaú.

O fósforo total apresentou-se ao longo da área de estudo com valores mais elevados no cenário 4 quando comparado ao cenário 3, com exceção do reservatório Poções e do trecho a montante do reservatório Epitácio Pessoa. O nitrogênio total apresentou-se inversamente ao fósforo total, com menores concentrações no cenário 4, com maiores concentrações no cenário 3, com exceção dos trechos entre a jusante do reservatório Poções e a jusante do reservatório Camalaú.

Quando verificados o atendimento à Resolução Conama 357/05 (BRASIL, 2005), pode-se observar que no cenário 4, foi maior a ocorrência de concentrações de DBO e nitrogênio total, que atenderam os requisitos mínimos para águas de classe 2.

Alguns fatores como aumento no escoamento e transporte do sedimento, nutrientes e matéria orgânica ao longo do rio, provenientes do aumento da vazão na bacia do rio Paraíba com a chegada das águas do rio São Francisco, podem ter influenciado a elevação das concentrações de alguns parâmetros no cenário 4. Além da liberação interna do sedimento nos reservatórios Camalaú e Epitácio Pessoa, acarretado pela maior ressuspensão de nutrientes na água.

São necessários cautela e planejamento na emissão de novas outorgas e na manutenção daquelas que não são prioritárias, para garantia da manutenção dos usos múltiplos da água de forma sustentável e das condições ecológicas do ecossistema aquático. Os resultados dos cenários mostram que a sustentabilidade hídrica no Alto Curso do rio Paraíba, sobretudo, para o abastecimento público, está atrelada a uma alocação otimizada da água, uma vez que o volume de água dos reservatórios tem papel importante no potencial de autodepuração desses corpos hídricos.

Para que possam ser observadas melhorias efetivas da qualidade da água na bacia do rio Paraíba e na vida das populações a serem beneficiadas com a chegada das águas do PISF, a gestão dos recursos hídricos deve estar focada no planejamento preventivo dos recursos hídricos frente às mudanças climáticas, na eficácia da gestão operacional das vazões do PISF no Eixo Leste, no planejamento eficiente da alocação da água, com participação mais influente da sociedade civil, no tratamento e lançamento dos esgotos e efluentes, tanto na bacia do São Francisco como no rio Paraíba, e na aplicação de tecnologias que possibilitem cada vez mais o conhecimento das informações acerca dos recursos hídricos e que permitam examinar os impactos e a capacidade de resiliência do ecossistema em questão.

5.2 RECOMENDAÇÕES

Existem diversos desafios a serem trabalhados na gestão das águas do PISF. Com base nos resultados gerados nesta pesquisa, algumas recomendações de temas para futuros estudos são propostos como estratégias para auxiliar na gestão dessas águas:

- Mapeamento de novos pontos para ampliação do monitoramento da qualidade da água.
- Realização de simulações considerando as mudanças climáticas e novas demandas de uso da água na região do Alto Curso do rio Paraíba.
- Simulações e ensaios ecotoxicológicos considerando os efeitos da atividade de aquicultura nos reservatórios.
- Simulações considerando os organismos aquáticos bioindicadores.
- Estratégias de cooperação entre os operadores estaduais para padronização e ampliação da rede de monitoramento quali-quantitativo, auxiliando na governança da água.
- Controle das perdas do sistema, da real vazão retirada dos reservatórios e dos usuários.
- Controle das retiradas clandestinas e dos usos impróprios nos canais do Eixo Leste do PISF.

Os resultados desta pesquisa servem como ferramentas de análise, experiência e aprendizado para gestão da água no Alto Curso do rio Paraíba e no Eixo Leste do PISF. Espera-se que possa promover reflexões e subsidiar os processos de tomada de decisão, de modo a garantir o abastecimento público e os demais usos da água na bacia, de forma sustentável, promovendo melhoria da qualidade de vida da população beneficiária.

REFERÊNCIAS

AESA – AGÊNCIA EXECUTIVA DE GESTÃO DAS ÁGUAS DO ESTADO DA PARAÍBA. **Proposta de Instituição Do Comitê Da Bacia Hidrográfica Do Rio Paraíba, Conforme Resolução No 1, de 31 de Agosto de 2003, do Conselho Estadual de Recursos Hídricos do Estado Da Paraíba. Março 2004.** Disponível em: <http://www.aesa.pb.gov.br/aesa-website/wp-content/uploads/2017/06/Proposta-de-Cria%C3%A7%C3%A3o-do-Comit%C3%AA-do-Rio-Para%C3%ADba.pdf> . Acesso em: 05.08.2020.

AESA – AGÊNCIA EXECUTIVA DE GESTÃO DAS ÁGUAS DO ESTADO DA PARAÍBA. Resolução nº 01, de 18 de dezembro de 2017. Dispõe sobre o estabelecimento de restrições ao uso das águas do Rio Paraíba e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, 18 dez. 2017. Seção 1, p. 1-3., 2017.

AESA – AGÊNCIA EXECUTIVA DE GESTÃO DAS ÁGUAS DO ESTADO DA PARAÍBA. Governo do Estado da Paraíba - AESA. **Volume diário dos principais açudes. Evolução diária em 01/2020.** Disponível em: <http://www.aesa.pb.gov.br/aesa-website/monitoramento/volume-mensal/?tipo=anterior> Acesso em: 02/01/2020

AESA – AGÊNCIA EXECUTIVA DE GESTÃO DAS ÁGUAS DO ESTADO DA PARAÍBA. **Boletim de monitoramento por sensoriamento remoto e geoprocessamento da área de abrangência do PISF (Projeto de Integração do rio São Francisco no rio Paraíba) – Eixo Leste – Abril de 2021.** João Pessoa, 14 p., 2021b. Disponível em: <http://www.aesa.pb.gov.br/aesa-website/wp-content/uploads/2021/04/BOLETIM-DE-MONITORAMENTO-DO-PISF-ABRIL-2021.pdf> Acesso em: 27 de fevereiro de 2022.

ALAMY FILHO, José Eduardo; SALLA, Marcio Ricardo; MAGALHÃES, Ariel Ali Bento; GUIMARÃES, Túlio Machado Humberto; PEREIRA, Carlos Eugenio. Aplicação da ferramenta computacional QUALI-TOOL na avaliação da qualidade da água em ambiente lótico. **Revista DAE**, v. 67, n. 215, 2019.

ALMEIDA, Márcia Araújo de; Curi, Wilson Fadlo. Gestão do uso de água na bacia do Rio Paraíba, PB, Brasil com base em modelos de outorga e cobrança. **Revista Ambiente & Água**, v. 11, n. 4, 17 p., 2016.

ALVES, Francisco Glauber César, ARAÚJO, Flávia Teles de Vilela. Sistemas de abastecimento em comunidades rurais do semiárido: a implantação do SISAR em Cristais, Cascavel, CE. **Rev. Tecnol. Fortaleza**, v. 37, n. 1, p. 78-86, 2016.

ALVES, Raylton. **Agência realiza oficina sobre marcos regulatórios em sistemas hídricos do Semiárido.** Agência Nacional das Águas – ANA, 2016. Disponível em: http://www2.ana.gov.br/Paginas/imprensa/noticia.aspx?id_noticia=13113 Acesso em: 06/09/2017

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Resolução nº 707, de 21 de dezembro de 2004. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, 21 de dez. 2004. Seção 1, 8 p.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: regiões hidrográficas brasileira – Edição Especial**. Brasília: ANA, 2015, 163 p.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Resolução Conjunta ANA e AESA-PB nº 1.397, de 21 de novembro de 2016. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, 22 de nov. 2016. Seção 1, p. 110.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Resolução Nº 1.938, de 30 de outubro de 2017. Dispõe sobre procedimentos para solicitações e critérios de avaliação das outorgas preventivas e direito de uso de recursos hídricos. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, 06 de nov. 2017. Seção 212 p. 120.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Reservatórios do semiárido brasileiro: hidrologia, balanço hídrico e operação: Anexo A/AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO** – Brasília: ANA, 2017a.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Atlas esgotos: despoluição de bacias hidrográficas/AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO**, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Brasília: ANA, 88 p., 2017b.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2017: Relatório pleno/AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO**. Brasília: ANA, 169p., 2017 c.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO; AESA – AGÊNCIA EXECUTIVA DE GESTÃO DAS ÁGUAS DO ESTADO DA PARAÍBA. Resolução Conjunta ANA e AESA-PB nº 1.292, de 17 de julho de 2017. Dispõe sobre o estabelecimento de condições de uso de recursos hídricos superficiais e subterrâneos para o Sistema Hídrico Rio Paraíba – Boqueirão, durante o período de pré-operação do PISF (até o dia 26/03/2018), no Estado da Paraíba. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, 17 jul. 2017 d. Seção 1, p. 1-4, 2017d.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Atlas irrigação: uso da água na agricultura irrigada**. Brasília: ANA, 2017e, 86 p.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Atlas esgotos: despoluição de bacias hidrográficas/AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO**, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Brasília: ANA, 2017 f, 88 p.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO; AESA – AGÊNCIA EXECUTIVA DE GESTÃO DAS ÁGUAS DO ESTADO DA PARAÍBA. Resolução Conjunta ANA e AESA-PB nº 12, de 05 de março de 2018. Dispõe sobre permissão de descarga de água do Açude Epitácio Pessoa para o rio Paraíba a fim de garantir o abastecimento público do sistema proveniente do açude Argemiro Figueiredo. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, 05 mar. 2018. Seção 1, p. 1-2., 2018a.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Resolução Nº 63, de 04 de setembro de 2018. Dispõe sobre o Plano de Gestão Anual – PGA referente ao ano de 2018 para o Projeto de Integração do Rio São Francisco com Bacias Hidrográficas do Nordeste

Setentrional – PISF, no que diz respeito às disposições atinentes à ANA. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, 04 set. 2018. Seção 1, p. 1-3., 2018b.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO; AESA – AGÊNCIA EXECUTIVA DE GESTÃO DAS ÁGUAS DO ESTADO DA PARAÍBA. Resolução Conjunta ANA e AESA-PB nº 87, de 05 de novembro de 2018. Estabelece as condições de uso de recursos hídricos superficiais e subterrâneos para o Sistema Hídrico Rio Paraíba – Boqueirão, no Estado da Paraíba, durante o período de pré-operação do Projeto de Integração do Rio São Francisco com Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional – PISF. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, 05 nov. 2018. Seção 1, p. 1-4., 2018c.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Plano Nacional de Segurança Hídrica**. Brasília: ANA, 2019a, 112 p.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Manual dos usos consuntivos da água no Brasil**. Brasília: ANA, 2019b, 75 p.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2017: Informe anual/AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO**. Brasília: ANA, 2019c, 110 p.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **ODS 6 no Brasil: visão da ANA sobre os indicadores**. Brasília: ANA, 2019d, 94 p.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Outorga dos direitos de uso dos recursos hídricos**. Brasília: ANA, 2019e, 80 p.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO; AESA – AGÊNCIA EXECUTIVA DE GESTÃO DAS ÁGUAS DO ESTADO DA PARAÍBA. **Termo de Alocação de Água 2019/2020 – Sistema Hídrico Epitácio Pessoa (PB) – Bacia Hidrográfica do rio Paraíba**. Boqueirão, 13 junho de 2019. 13 p., 2019f.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental**. 2020a. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/as-12-regioes-hidrograficas-brasileiras/atlantico-ne-oriental> Acesso em: 05/07/2019

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO; AESA – AGÊNCIA EXECUTIVA DE GESTÃO DAS ÁGUAS DO ESTADO DA PARAÍBA. **Termo de Alocação de Água 2020/2021 – Sistema Hídrico Epitácio Pessoa (PB) – Bacia Hidrográfica do rio Paraíba**. Brasília, 03 julho de 2020. 7 p., 2020b.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2020: Informe anual/AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO**. Brasília: ANA, 2020c, 118 p.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO; AESA – AGÊNCIA EXECUTIVA DE GESTÃO DAS ÁGUAS DO ESTADO DA PARAÍBA. **Termo de Alocação de Água 2021/2022 – Sistema Hídrico Epitácio Pessoa (PB) – Bacia Hidrográfica do rio Paraíba**. Brasília, 02 julho de 2021. 7 p., 2021a.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2021: Relatório Pleno/AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO**. Brasília: ANA, 2021b. Disponível em: <https://relatorio-conjuntura-ana-2021.webflow.io/> Acesso em: 12 de fevereiro de 2022.

ANAGNOSTIDIS K.; KOMÁREK J. Modern approach to the classification system of cyanophytes. 3 – Oscillatoriales. **Archives Hydrobiology Supplement**. V. 80, n. 1-4. (Algological Studies 50-53), p. 327-472. 1988.

ANDERSON, D. L. **Utah's Perspective The Colorado River**. 2002.

ANDRADE, E. M.; PALÁCIO, H. A. Q.; CRISÓSTOMO, L. A.; SOUZA, I. H.; TEIXEIRA, A. S. Índice de qualidade de água, uma proposta para o vale do rio Trussu, Ceará. **Revista Ciência Agronômica**, Ceará, v.36, n.2, p.135-142, 2005.

ANDRADE; L. R.S; ANDRADE, M.Z.S.S; ARAÚJO; S.M.S. Estudo comparativo da qualidade da água do açude Epitácio Pessoa antes e depois da transposição. *Anais III workshop internacional sobre água no semiárido brasileiro*. Campina Grande – PB, 2017. Disponível em: <<https://editorarealize.com.br/artigo/visualizar/39027>>. Acesso em: 04/06/2020

ANJOS, F. A. dos; FERRAZ, R. L; de. S.; AZEVEDO, C. A. V. de; COSTA, P. da S.; MELO, A. S. de; RAMALHO, V. R. R. de A. R. Relationship between physiology and production of maize under different water replacements in the Brazilian semi-arid. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.26, n.1, p.21-27, 2022.

APHA - American Public Health Association. **Standard Methods For The Examination of Water and Wastewater**, 23 ed. Washington, DC, 2017.

ARAGÃO, Talita Gabrielle. Transposição das águas do rio São Francisco para a bacia do rio Paraíba: uma avaliação da sinergia e sustentabilidade hídrica utilizando o modelo de rede de fluxo ACQUANET. *Dissertação apresentado ao programa de pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande*, Paraíba, 139 p., 2008.

ARAGÃO-TAVARES, N. K. C. A; SEVERIANO, JS. A. M., AN. Phytoplankton composition of the Itaparica and Xingó reservoirs, São Francisco river, Brazil. **Brazilian Journal of Biology**. p. 145-154, 2015.

ARAÚJO, A. F. Modelagem matemática da qualidade da água como suporte ao enquadramento de corpos de água: o caso do rio Sirinhaém - PE. *Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado em Mestrado Profissional em Tecnologia Ambiental, do Instituto de Tecnologia de Pernambuco*, p. 83, 2013.

ARAÚJO, L. E. de; MORAES NETO, J. M. de; SOUSA, F. de A. Sa. de. Análise climática da bacia do rio Paraíba – Índice de anomalia de chuva (IAC). **Engenharia Ambiental**, v. 6, n. 3, p. 508 – 523, 2009.

ARAÚJO, M. D. de; OLIVEIRA, R. de. A hybrid approach associating flow network modeling with AHP-Entropy for simulating and ranking water-demand management alternatives. **Rev. Ambient. Água**. vol. 16 n. 2, e2627, 2021.

ARAÚJO-FILHO, José C. de; GUNKEL, Günter; SOBRAL, Maria C. M.; KAUPENJOHANN, Martin; LOPES, Helio L. Soil attributes functionality and water

eutrophication in the surrounding area of Itaparica Reservoir, Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, n.9, p.1005–1013, 2013.

ARRUDA, Nailza Oliveira de. Controle e aporte de fósforo no reservatório de Itaparica localizado no semiárido nordestino. *Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE*, 187 p., 2015.

AZEVEDO, D. J. S.; AZEVÊDO, E. L.; GOMES, W. I. A.; BEZERRA NETO, J. F.; MOLOZZI, J. Qualidade de água em reservatórios durante seca prolongada: uma discussão para avaliação dos efeitos de mudanças climáticas. *In: Anais do IV Congresso Baiano de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2016. Cruz das Almas-BA*, 13 a 16 de julho de 2016.

AZEVEDO, L. G. T; PORTO, R.L.L; MÉLLO JUNIOR, A V; PEREIRA, J. G; ARROBAS, D La P.; NORONHA, L.C.; LUIZ CORREA, P. **Transferência de água entre Bacias Hidrográficas**. Banco Mundial- 1º Edição, Brasília, 2005.

BARBOSA, J. E. L. ; WATANABE, T. O fitoplâncton como discriminador ambiental no diagnóstico das bacias hidrográficas envolvidas no projeto de transposição do Rio São Francisco para o Nordeste Setentrional. *In: V Simpósio de Ecossistemas Brasileiros: conservação*, Vitória-ES: Universidade Federal do Espírito Santo, v. 4. p. 449-456, 2000.

BARBOSA, J. E. L.; WATANABE, T.; MOREDJO, A.; ABÍLIO, F.J.P. A hipereutrofização e suas implicações na biocenose de um ecossistema aquático urbano de João Pessoa-PB, Brasil. **Revista Nordestina de Biologia**, v. 15, n. 1, p. 1-13, 2001.

BARBOSA, J. E. L.; ANDRADE, R. S.; LINS, R. P.; DINIZ, C. R. Diagnóstico do estado trófico e aspectos limnológicos de sistemas aquáticos da Bacia Hidrográfica do Rio Taperoá, Trópico semi-árido Brasileiro. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v. 1, 81-89, 2006.

BARBOSA, J. E. D. L., MEDEIROS, E. S. F., BRASIL, J., CORDEIRO, R. D. S., CRISPIM, M. C. B., SILVA, G. H. G. D. Aquatic systems in semi-arid Brazil: limnology and management. **Acta Limnologica Brasiliensia**, v. 24, p. 103–118, 2012.

BARBOSA, J. E. de L., SEVERIANO, J. dos S., CAVALCANTE, H., LUCENA-SILVA, D. de, MENDES, C. F., BARBOSA, V. V., SILVA, R. D. dos S., OLIVEIRA, D. A. de, MOLOZZI, J. Impacts of inter-basin water transfer on the water quality of receiving reservoirs in a tropical semi-arid region. **Hidrobiologia**, 848: 651-673, 2021.

BARBOSA, Vanessa Virginia; MENDES, Camila Ferreira; CRUZ, Patrícia Silva; NERY, Janiele França; BARBOSA, José Etham de Lucena. Mudanças do estado trófico da água em reservatórios do semiárido brasileiro em períodos de longas estiagens. *In: Anais do IV Congresso Baiano de Engenharia Sanitária e Ambiental, Cruz das Almas-BA*, 2016.

BEZERRA, Iury Steiner de Oliveira; MENDONÇA, Luiz Alberto Ribeiro; FRISCHKORN, Horst. Autodepuração de cursos d'água: um programa de modelagem Streeter Phelps com calibração automática e correção de anaerobiose. **Rev. Esc. Minas**, v.61, n.2, 2008.

BRAGA, B.; BARBOSA, P. S. F. & NAKAYAMA, P. T. Sistema de Suporte à Decisão em Recursos Hídricos. **Revista brasileira de recursos hídricos - RBRH**, vol. 3, nº 3. 1998.

BICUDO, C. E. D. M.; MENEZES, M. **Gêneros de Algas de Águas Continentais do Brasil - chave para identificação e descrições**. 2º ed., São Carlos: RiMA, 2006.

BITTENCOURT-OLIVEIRA, M. C.; PICCIN-SANTOS, V.; MOURA, A. N.; ARAGÃO-TAVARES, N. K. C.; CORDEIRO-ARAÚJO, M. K. Cyanobacteria, microcystins and cylindrospermopsin in public drinking supply reservoirs of Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, 86(1):297-309, 2014.

BRASIL. Resolução CONAMA nº 20, de 18 de junho de 1986. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, 18 jun. 1986. 13 p., 1986.

BRASIL. Lei Nº 9433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, 8 jan. 1997. Seção 1, 13 p., 1997.

BRASIL, MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. **RIMA - Projeto de Integração do Rio São Francisco com as Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional**. Brasília, 2004.

BRASIL. Leis, Decretos, etc. Resolução Conama nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, 18 mar. 2005. Seção 1, p. 58-63.

BRASIL, Decreto Nº 5.995, de 19 de dezembro de 2006. Institui o Sistema de Gestão do Projeto de Integração do Rio São Francisco com as Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional, e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, 19 de dezembro de 2006 Seção 1, p. 8., 2006.

BRASIL, Leis, Decretos, etc. Resolução Conama nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, 16 de maio de 2011. Seção 1, p. 11., 2011b.

BRASIL, MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. **Projeto de Integração do Rio São Francisco. Ministério da Integração Nacional**. 2016. Disponível em: <http://www.mi.gov.br/web/projeto-sao-francisco/entenda-os-detalhes> Acesso em: 20/12/2016

BRASIL, PORTARIA Ministério da Saúde. Portaria de Consolidação nº 5, de 28 de setembro de 2017. Dispõe sobre a consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, 28 de setembro de 2017. Seção 1, p. 473., 2017.

BRASIL, MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL - MI. **Transposições pelo mundo**. Disponível em: <http://integracao.gov.br/web/projeto-sao-francisco/transposicoes-pelo-mundo>. Acesso em: 02/12/2018

BRASIL, Lei Nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, 16 de julho de 2020. Seção 1, 2020.

BRITO, Whelson Oliveira de; SANTOS, Keliana Dantas; SANTOS, Ricardo Alves dos; MOURA, Hildegardes Pereira de. Avaliação da água do reservatório Poções em Monteiro/PB: uso para abastecimento humano e construção civil. **Revista ENECT**, v. 4, 10 p., 2012.

BUCCI, M. H. S.; OLIVEIRA, L. F. C. de. Índices de Qualidade da Água e de Estado Trófico na Represa Dr. João Penido (Juiz de Fora, MG). **Rev. Ambient. Água**, Taubaté, v. 9, n. 1, 19 p., 2014. Doi: 10.4136/ambi-agua.1290.

BUCHHEIM, M. A.; MICHALOPULOS, E. A.; BUCHHEIM, J. A. Phylogeny of the Chlorophyceae with special reference to the Sphaeropleales: a study of 18S and 26S rDNA data. **Journal of Phycology**. 37: 819-835. 2001.

BUENO, Eduardo de Oliveira; OLIVEIRA, Vinícius Augusto de; VIOLA, Marcelo Ribeiro; MELLO, Carlos Rogério de. Desempenho do modelo SWAT para diferentes critérios de geração de unidades de resposta hidrológica. **Revista Scientia Agraria**, v. 18, n. 2, p.114 – 125, 2017.

CALDAS, Hidaiane Fayga Matias. Análise da evolução espaço-temporal da qualidade da água no Eixo Leste do Projeto de Integração do Rio São Francisco. *Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)*, 134 p., 2021.

CALDAS, H. F. M.; OLIVEIRA JÚNIOR, A. I. de.; MARWELL, D. T. B.; SOBRAL, M. do C. M. Desafios da gestão ambiental na transferência de água entre bacias: estudo de caso da integração do rio São Francisco, Brasil. **Revista DAE**, v. 70, n. 234, p. 142 – 154, 2022.

CAMPOS, Jander Duarte. Desafios do gerenciamento dos recursos hídricos nas transferências naturais e artificiais envolvendo mudança de domínio hídrico. *Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ*, 438 p., 2005.

CARDOSO, Ariane Silva; MARWELL, Davi Tadeu Borges; SOBRAL, Maria do Carmo Martins; MELO, Gustavo Lira de; CASÉ, Maristela Costa Cunha. Análise da presença do fitoplâncton em bacia integrante do Projeto de Integração do Rio São Francisco, região semiárida, Nordeste brasileiro. **Eng. Sanit. Ambient.** Rio de Janeiro, v. 22, n. 2., 2017a.

CARDOSO, Ariane Silva. Uso de ferramentas integradas para avaliação da qualidade da água de um sistema de piscicultura no semiárido de Pernambuco, Brasil. *Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente*, da Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 127 p., 2017b.

CARDOSO, Ariane Silva; NOGUEIRA DA SILVA, Gérsica; MARQUES, Érika Alves Tavares; ASSIS, Janaína Maria Oliveira de; OLIVEIRA, Cláudia Ricardo de; PINHEIRO, Anderson Ferreira; SOBRAL, Maria do Carmo Martins; CUNHA, Maristela Casé Costa. Ferramentas de avaliação de impactos da piscicultura na qualidade de água: estudo de caso em reservatório no submédio São Francisco. *In: Anais do XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Florianópolis, 8p., 2017c.

CARDOSO, Ariane Silva; ALVES, Anthony Epifanio; MARQUES, Érika Alves Tavares; CASTRO, Cristiane Maria Varela de Araújo; CASÉ, Maristela; SOBRAL, Maria do Carmo

Martins. Toxic degree evaluation for fish farming in Pernambuco (Brasil). **Braz. J. of Develop.** v. 5, n. 11, p. 24934-24961, 2019.

CARLSON, R. E. **A trophic state index for lakes.** Limnology and oceanography, 361, v. 22 (2), march, 1977.

CARVALHO, A. C.; CARMONA, J. S.; NETO, M. F. A.; BARRETO, F. M. S. Avaliação do Índice de Qualidade da Água e do Índice de Estado Trófico no reservatório Canafístula, próximo à captação da CAGECE – Iracema/CE. In: *Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 26, 2011, Porto Alegre. Anais....* Porto Alegre: ABES, p. 1 – 7, 2011.

CARVALHO, D. F.; MARTINS, R. C. F.; SANTOS, J. J. S.; TELES, G. C.; GENTILE, M. A. D.; OLIVEIRA, M. S. Evolution and current scenario of irrigated area in Brazil: Systematic data analysis. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 24, n. 8, p. 505-511, 2020.

CARVALHO, Flávio Hermínio de. Uso do modelo SWAT na estimativa da vazão e da produção de sedimentos em bacia agrícola do cerrado brasileiro. *Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Agronomia, da Universidade de Brasília*, 152 p., 2014.

CARVALHO, Maiara Soares de; MANNICH, Michael; PINTO, Bruna Vigo; CUNHA, Cinthia Mara Itiberê da. Variação nictemeral da qualidade da água em rios urbanos: implicações no monitoramento. **REGA**, v. 13, n.2, p. 129 – 141, 2016. Doi: 10.21168/rega.v13n2.p129-141

CARVALHO, Mirléia A. de; Mélo-Júnior, Arisvaldo V.; SCHARDONG, André; PORTO, Rubem L. L. Sistema de suporte à decisão para alocação de água em projetos de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 1, p. 10 – 17, 2009.

CASSINI, Pedro Santana. Aplicação do modelo EPA-AQUATOX à Baía de Vitória (Vitória – ES). *Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, I da Universidade Federal do Espírito Santo*, Vitória, 123 p., 2011.

CASTRO, César Nunes de. **Transposição do rio São Francisco: Análise de oportunidade do projeto.** Texto para discussão 1577/Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA. 60 p., 2011.

CAÚLA, Bleine Queiroz. Q; MOURA, Graziella Batista de. Aspectos Ambientais e Jurídicos da Transposição do Rio São Francisco. In: *Anais do III Encontro da ANPPAS*, Brasília, 2006.

CAVALCANTE, H., ARAÚJO, F., BECKER, V., BARBOSA, J. E. de L. Internal phosphorus loading potential of a semiarid reservoir: an experimental study. **Acta Limnol. Bras.**, n. 33, 2021. <https://doi.org/10.1590/S2179-975X10220>

CELIMAR, Azambuja Teixeira. Gerenciamento integrado de quantidade e qualidade de água. *Tese apresentada ao Programa de Engenharia Civil da Universidade de São Paulo*, 273 p., 2004.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Apêndice D – Índices de Qualidade das Águas.** São Paulo: CETESB, 2017. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/wp-content/uploads/sites/12/2013/11/Cetesb_QualidadeAguasInteriores_2017_02-06_VF.pdf> Acesso: em: 20 abr. 2020.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Qualidade das águas interiores no Estado de São Paulo 2017. Série Relatórios.** São Paulo, 2018. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/wp-content/uploads/sites/12/2018/06/Relat%C3%B3rio-de-Qualidade-das-%C3%81guas-Interiores-no-Estado-de-S%C3%A3o-Paulo-2017.pdf> Acesso em: 20 mar. 2020.

CHAPRA, S. C. **Surface Water-Quality Modeling.** Waveland Press, 844 p., 2008.

CHESF – Companhia Hidroelétrica do São Francisco. **Carta Circular SOO-004/2022.** Vazões defluentes das UHE de Sobradinho e Xingó. Carta CTA-NOS DGL 0053/2022. Recife, 2022. Acesso em: 01 de fevereiro de 2022. Disponível em: <https://www.chesf.gov.br/SistemaChesf/Documents/Carta%20Circular%20SOO%200004%202022%20-%20Vaz%C3%B5es%20defluentes%20das%20UHE%20de%20Sobradinho%20e%20Xing%C3%B3.pdf>

CRUZ, P. S. C., CAVALCANTE, H., VIANA, L. G., SILVA, R. D. dos S., OLIVEIRA, D. A. de., BARBOSA, J. E. de L. Diversidade da comunidade fitoplacntônica em reservatório do semiárido brasileiro durante período de estiagem prolongada. **Revista Brasileira de Agrotecnologia**, v. 7, n. 3, p. 063, 2017.

CRUZ, P. S. C., SILVA, R. D. dos S., OLIVEIRA, D. A. de, VIANA, L. G., SILVA, D. de L., BARBOSA, J. E. de L. Dinâmica do fitoplâncton e evolução trófica de reservatório no semiárido brasileiro. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 13, n. 4, p. 495-500, 2018.

CUNHA, A. M.; CASÉ, M.; LOPES, D. V. Qualidade da água como reflexo de atividades antrópicas em bacias hidrográficas do Nordeste, Brasil. **Geosul**, Florianópolis, v. 34, n. 72, p. 102-123, 2019.

DASH, S.; KALAMDHAD, A. S. Science mapping approach to critical reviewing of published literature on water quality indexing. **Ecological Indicators**, v. 128, 107862, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107862>

DAVID, G. S.; CARVALHO, E. D.; LEMOS, D.; SILVEIRA, A. N.; DALL'AGLIO-SOBRINHO, M. Ecological carrying capacity for intensive tilapia (*Oreochromis niloticus*) cage aquaculture in a large hydroelectrical reservoir in Southeastern Brazil, **Aquacultural Engineering**, v. 66, p. 30-40, 2015.

DE ANDRADE, J. G. P., BARBOSA, P. S. F., SOUZA, L. C. A., MAKINO, D. L. Interbasin water transfers: the Brazilian experience and international case comparisons. **Water Resources Management**, v. 25. P.1915–1934, 2011.

DEUS, Ricardo; BRITO, David; KENOV, Isabella Ascione; LIMA, Marcelo; COSTA, Vanessa; MEDEIROS, Adaelson; NEVES, Ramiro; ALVES, C. N. Three-dimensional model for analysis of spatial and temporal patterns of phytoplankton in Tucuruí reservoir, Pará, Brazil, **Ecological Modelling**, v. 253, p. 28 – 43, 2013.

DI BERNARDO, L; MINILLO, A.; DANTAS, A. D. B. **Florações de algas e de cianobactérias: suas influências na qualidade da água e nas tecnologias de tratamento.** São Carlos: LDiBe Ltda., 536p., 2010.

DINIZ, Célia Regina; BARBOSA, José Etham de Lucena; CEBALLOS, Beatriz Susana Ovruski de. Variabilidade temporal (nictemeral vertical e sazonal) das condições limnológicas de açudes do trópico semi-árido paraibano. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, suplemento especial, n. 1, 19 p., 2006.

DNOCS. Açude Poções. Descrição geral. 2019. Disponível em: <https://www.dnocs.gov.br/~dnocs/doc/canais/barragens/Barragem%20da%20Paraiba/pocoets.htm> Acesso em: 25/10/2019

ESTEVEES, Francisco de Assis. **Fundamentos da limnologia**. Rio de Janeiro: Ed. Interciência, 3ª edição, 826 p., 2011.

FARIAS, Emmanuel Eduardo Vitorino de; CURI, Wilson Fadlo; DINIZ, Laudízio da Silva. São Francisco river Integration Project, Eastern Axis: losses analysis and performance indicators. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.22, e. 47, 13 p., 2017.

FARIAS, Thiago da Silva; CARVALHO-NETO, João Filadelfo de; VIANNA, Pedro Costa Guedes. Programas de abastecimento hídrico: um diagnóstico do atendimento do P1MC e da operação Pipa no semiárido. *Anais do I Congresso Internacional da diversidade do semiárido – CONIDIS. Editora Realize*, v.1, 2016.

FARO, Guilherme Todt Cardoso de; GARCIA, Joaquin Ignacio Bonnacarrère. Simulação dos critérios operacionais do sistema Cantareira para avaliação do programa AcquaNet na modelagem de problemas complexos de alocação de água. *In: Anais do XXII Símposio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Florianópolis- SC, 2017.

FEITOSA, Michelle Albuquerque. Pesca artesanal no semiárido paraibano: enfoque etnoictológico. *Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento e Meio ambiente – PRODEMA*, na Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 113 p., 2011.

FERREIRA, André Luiz Nunes. Análise integrada da qualidade de água dos corpos hídricos do projeto de integração do Rio São Francisco no nordeste do Brasil. *Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco*, Recife, 2016. 148 p.

FERREIRA, Lucianna Marques Rocha; ESTEVES, Luciana Slomp; SOUZA, Enio Pereira de; SANTOS, Carlos Antonio Costa dos; RÊGO, Veneziano Guedes de Sousa. Mudanças espaço temporal da disponibilidade de serviços ecossistêmicos em uma microbacia hidrográfica do nordeste brasileiro. **Revista de Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 52, p. 155 – 174, 2019.

FREIRE, F. G. C.; BATISTA, R., O.; SILVA, P. C. M. da; COSTA, S. C.; OLIVEIRA, A. de F. M. Indicadores de qualidade da água no Rio Jaguaribe em São João do Jaguaribe-CE, Brasil. **Brazilian Journal of Irrigation and Drainage**. V. 18, n. 4, p. 700-707, 2013.

GASTALDINI, M. do C. C.; PAZ, M. F.; KRAEMER, M. C. N.; PAIVA, E. M. C. D. de; PAIVA, J. B. D. de. Modelagem matemática da qualidade das águas do reservatório do Arroio Vacacaí-Mirim. *Anais: XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*, Cancún, México, AIDIS, 2002.

GOMES, B. F. M. L.; SOUZA, S. S. O. de; CUNICO, C. Caracterização de variáveis fisiográficas da bacia hidrográfica do rio Paraíba-PB: subsídios para a identificação das

unidades ambientais naturais. In: *Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada e I Congresso Nacional de Geografia Física, Campinas – SP, 2017.*

GOMES, M. E. S.; SIMPLÍCIO, L. dos S.; LIMA, T. S.; ANDRADE, A. T. de; CASÉ, M. Microalgas planctônicas em evento de floração de espécie invasora em reservatório hidroelétrico no semiárido nordestino. In: *Barbosa, Frederico Celestino. B238C Ciências biológicas: as diversas manifestações da vida / Frederico Celestino Barbosa. – Piracanjuba-GO. Editora Conhecimento Livre, p. 80 – 91, 2021. Doi: 10.37423/2110049510*

GOMES, Wilma Izabelly Ananias; CHAVES, Tatiany Liberal Dias; SILVA, Daniely de Lucena; SILVA, Mônica Maria Pereira da; MOLOZZI, Joseline. Avaliação da qualidade da água em reservatórios de abastecimento: perspectivas sobre os impactos das mudança climáticas. *Anais do I Congresso Internacional da diversidade do semiárido – CONIDIS. Editora Realize, v.1, 2016.*

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. “*Dados do Censo 2010 publicados dia 04/11/2010*”. Disponível em: <https://censo2010.ibge.gov.br/resultados.html> Acesso 10/05/2017.

JAMES, A. **An introduction to water quality modeling.** John Wiley & Sons: Chichester, 311p., 1993.

JUNIOR, R. J. A. Evolução temporal dos níveis tróficos do açude Epitácio Pessoa, Semiárido paraibano. *Dissertação (Mestrado) apresentada ao Programa de Ciência e Tecnologia Ambiental, Universidade Estadual da Paraíba, 70 p., 2009.*

KHAN, S.; HAFEEZ, M. M.; RANA, T.; MUSHTAQ, S. Enhancing water productivity at the irrigation system level: A geospatial hydrology application in the Yellow River Basin. **Journal of Arid Environments**, vol.72, pág. 1046–106, 2008.

KOMÁREK J.; ANAGNOSTIDIS K. Modern approach to the classification system of the cyanophytes 4:Nostocales. **Algological Studies**. v. 56, p. 247–345. 1989.

KOMÁREK J.; ANAGNOSTIDIS K. Cyanoprokaryota 1. Chroococcales. – In: *Ettl H., Gärtner G., Heynig H. & Mollenhauer D. (eds), Süßwasserflora von Mitteleuropa 19/1, p. 548, Gustav Fischer, Jena-Stuttgart-Lübeck-Ulm, 1998.*

KOMÁREK, J.; ANAGNOSTIDIS, K. Cyanoprokaryota 2. Teil: Oscillatoriales. Pp. 1-759. In: B. Bridel; G.L. Gastner & M.S. Krienitz (eds.). **Süßwasserflora von Mitteleuropa**, 19/2. London, Elsevier. 2005.

KOMÁREK, J.; FOTT, B. Chlorophyceae (Grünalgen), Ordiniung: Chlorococcales. In: *G.Huber-Pestalozzi, H. Heynig & D. Mollenhauer(eds.). Das Phytoplankton des Süßwasser:systematik und biologie. E. Schweizerbart'scheVerlagsbuchhandlung, Stuttgart, pp. 1-1044, 1983.*

KUMAR, P. Numerical quantification of current status quo and future prediction of water quality in eight Asian megacities: challenges and opportunities for sustainable water management. **Environ Monit Assess**, 191: 319, 2019. DOI 10.1007/s10661-019-7497-x.

LACERDA, A. V. de. **A semi-aridez e a gestão em bacias hidrográficas: visões e trilhas de um divisor de ideias**. João Pessoa: Autor Associado/UFPB, 164p., 2003.

LAMPARELLI, M. C. Grau de trofia em corpo d'água do Estado de São Paulo: Avaliação de métodos de monitoramento. São Paulo. *Tese apresentada ao Instituto de Biociência da Universidade de São Paulo - USP*, 2004.

LANE, R. R.; DAY JR., J. W.; KEMP, G. P.; DEMCHECK, D. K. The 1994 experimental opening of the Bonnet Carre spillway to divert Mississippi River water into Lake Pontchartrain, Louisiana. **Ecological Engineering**, v. 17, p. 411–422, 2001.

LEANDRO, Gustavo Roberto dos Santos; ROCHA, Paulo Cesar. Agricultural expansion and environmental degradation in the Sepotuba river basin - Alto Paraguai, Mato Grosso - Brazil. **Revista Sociedade & Natureza**, v.31, p. 1-121, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.14393/SN-v31-2019-45603>

LERNER, G. L. S.; CARPIO, L. G. T. Estudo de impactos na geração hidroelétrica ao longo do rio São Francisco devido à Transposição de suas águas utilizando modelo matemático de fluxos em rede Acquanet. In: *Anais do XXXVIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Goiânia*, 12 p., 2006.

LHWC - LESOTHO HIGHLANDS WATER COMMISSION (Kingdom of Lesotho Republic of South Africa). **Project description**. Disponível em: <<http://www.lhda.org.ls/lhdaweb>>. Acesso em: 16 de março de 2022.

LI, Y.; TANG, C.; WANG, C.; TIAN, W.; PAN, B.; HUA, L.; LAU, J.; YU, Z.; ACHARYA, K. Assessing and modeling impacts of different inter-basin water transfer routes on Lake Taihu and the Yangtze River, China. **Ecological Engineering**, 60: 399–413, 2013.

LIMA, B. P.; MAMEDE, G. L.; LIMA NETO, I. E. Monitoramento e modelagem da qualidade de água em uma bacia hidrográfica semiárida. **Eng Sanit Ambient**, v. 23, n. 1, p. 125 – 135, 2018.

LIMA, Berthyer Peixoto; MAMEDE, George Leite; LIMA NETO, Iran Eduardo. Monitoramento e modelagem da qualidade de água em uma bacia hidrográfica semiárida. **Eng Sanit Ambient**, v.23, n.1, p. 125 – 135, 2018.

LIMA, Raila Maria Oliveira; NERY, Gleydson Kleyton Moura; NERY, Janiele França. Desafios da pesca artesanal diante a crise hídrica no semiárido. *Anais do I Congresso Internacional da diversidade do semiárido – CONIDIS. Editora Realize*, v.1, 2016.

LOBO, E.; LEIGHTON, G. Estructuras comunitarias de las fitocenosis planctonicas de los sistemas de desembocaduras de rios y esteros de la zona central de Chile. **Revista Biología Marina y oceanografía**, 22(1): 1-29, 1986.

LUCAS, Ariovaldo Antonio Tadeu; AGUIAR NETTO, Antenor de Oliveira; FOLEGATTI, Marcos Vinicius; FERREIRA, Robério Anastácio. Calibração do modelo hidrodinâmico MIKE 11 para sub-bacia hidrográfica do rio Piauítinga, Sergipe, Brasil. **Revista Ambiente & Água**, v. 5, n.3, 2010.

LUCENA, Dátia Paula Marques Maia. Simulações da implantação de ações de gestão no açude Epitácio Pessoa e seus impactos na crise hídrica em Campina Grande-PB e região. *Dissertação*

apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECA) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), 94 p., 2018.

MAMEDE, G. L.; GUENTNER, A.; MEDEIROS, P. H.; ARAÚJO, J. C. de; BRONSTERT, A. Modeling the effect of multiple reservoirs on water and sediment dynamics in a semiarid catchment in Brazil. **Journal of Hydrologic Engineering**, n. 23: 05018020, 2018.

MARQUES, E. A. T.; SILVA, G. M. N.; OLIVEIRA, C. R.; CUNHA, M. C. C.; SOBRAL, M. C. Assessing the Negative Impact of an Aquaculture Farm on Effluent Water Quality in Itacuruba. **Water Science and Technology**, v. 78, p. 1483-1447, 2018.

MARQUES, E. A. T., GUNKEL, G., SOBRAL, M. C. Management of tropical river basins and reservoirs under water stress: experiences from northeast Brazil. **Environments**, 6: 62, 2019.

MARTIN, Nancy; MCEACHERN, Preston; YU, Tong; ZHU, David Z. Model development for prediction and mitigation of dissolved oxygen sags in the Athabasca River, Canada. **Science of The Total Environment**, v. 443, p. 403-412, 2013.

MASCARENHAS, Gelsomina Lima; CASÉ, Maristela Costa Cunha; MARTINS, Larissa Ribeiro; FERREIRA, Jucélia Tavares; LOPES, Denise Vieira. Caracterização do fitoplâncton das bacias do rio São Francisco, Moxotó e Paraíba, inseridas no projeto de integração do rio São Francisco. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.6, n.5, p. 1050-1068, 2013.

MEDEIROS, Giovana Cristina Santos de; MEDEIROS, Joana Darc Freire de; MAIA, Adelena Gonçalves. Avaliação do atendimento às demandas hídricas da bacia hidrográfica do rio Seridó-RN utilizando o modelo de rede de fluxo AcquaNet. In: *Anais do XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Brasília, 2015.

MEDLIN, L.K.; KACZMARSKA, I. Evolution of the diatoms: V. Morphological and cytological support for the major clades and a taxonomic revision. **Phycologia**. V. 43, p. 245-270. 2004.

MÉLLO JÚNIOR., A. V., PORTO, R. L. L., DORATIOTO, G., Sistema generalizado para análise de alocação de água. In: *Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Aracaju, 2001.

MÉLLO JÚNIOR, A.V.; PORTO, R.L.L.; SCHARDONG, A.; ROBERTO, A.N. Aplicação do método de pontos interiores para otimização de sistemas de recursos hídricos. In: *Anais do SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS*. Associação Brasileira de Recursos Hídricos, João Pessoa, v. 16., 2005.

MÉLLO JÚNIOR, A. V.; SCHARDONG, A.; PEDROTTI, A. . Multi-Objective Analysis Applied to an Irrigated Agricultural System on Oxisols. American Society of Agricultural and Biological Engineers. **Transactions**, v. 56, p. 1-12, 2013.

MENDES, Camila Ferreira; FERREIRA, Larissa Macena; MONTEIRO, Flávia Morgana; SEVERIANO, Juliana dos Santos; BARBOSA, José Etham de Lucena. Análise da dispersão de *Ceratium furcoides* (levander) langhans 1925 em reservatórios tropicais do nordeste brasileiro. In: *Anais do XIV Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, Maceió*, 8p., 2018.

MENDES, J. S.; BARBOSA, J.E.L. O índice de estado trófico como ferramenta no monitoramento da qualidade de água da Barragem de Acauã: sistema recém-construído sobre

o rio Paraíba – PB. In: XI Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2004, Natal, **Sociedade de Engenharia Sanitária**, p. 54-64, 2004.

MENINO, Ivonete Berto; CAVALCANTI, Janeide Albuquerque. Recursos hídricos, usos e contradições na bacia do Rio Paraíba. **Tecnol. & Ciên. Agropec.**, v.7, n.1, p.47-52, 2013.

METCALF; EDDY. **Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse**. 4th Edition, McGraw-Hill, NY, USA, 2003.

MILAN, B.F. Clean water and sanitation for all: interactions with other sustainable development goals. **Sustain. Water resour. Manag.**, v. 3, p. 479–489, 2017.

MINGOTI, S. A. **Análises de dados através de métodos de estatística multivariada – Uma abordagem aplicada**. Ed. UFMG, Belo Horizonte, 297 p., 2005.

MOHOR, G. S.; MENDIONDO, E. M. Economic indicators of hydrologic drought insurance under water demand and climate change scenarios in a Brazilian context. **Ecological Economics**, v. 140, p. 66-78, 2017.

MOLISANI, M. M.; BARROSO, H. S.; BECKER, H.; MOREIRA, M. O. P.; HIJO, C. A. G.; MONTE, T. M.; VASCONCELLOS, G. H. Trophic state, phytoplankton assemblages and limnological diagnosis of the Castanhão Reservoir, CE, Brazil. **Acta Limnologica Brasiliensia**, v. 22, n. 1, p. 1-12, 2010.

MORAES, M.; SOBRAL, M. C.; SILVA, H.; MELO, G. L. de; PEDRO, A.; CABRAL, J.; SARMENTO, P. Qualidade de água em reservatórios de regiões com escassez hídrica: Estudos de caso na região Mediterrânea de Portugal e região semiárida do Brasil. In: *Carlos de Oliveira Galvão; José Almir Cirilo; Jaime Cabral; Mônica, G. Agra de Medeiros. (Org.). Recursos hídricos para a convivência com o semiárido: abordagens por pesquisadores no Brasil, Portugal, Cabo Verde, Estados Unidos e Argentina*. 1ed., Porto Alegre: ABRH, v. 1, p. 301-330, 2011.

MORAIS, Edilaine Araújo de; CARVALHO, Jully Samara Ferreira de; ALMEIDA, Poliana Lourenço Ribeiro de; ALCANTÁRA, Hugo Moraes de; MEDEIROS, Paulo da Costa. Conflitos de acesso e uso da água na bacia do rio Paraíba após operação do projeto de integração do rio São Francisco. **Braz. J. of Develop.**, Curitiba, v. 6, n. 1, p. 5098-5108, 2020.

MORAIS, Rafael Dantas de; SILVA, Janaína Barbosa da; ARAÚJO, Alana Ramos. Análise espacial das margens do reservatório de água Epitácio Pessoa - PB: reflexões sobre a capacidade de armazenamento. **Revista de Estudos Ambientais – REA**, v. 16, n. 1, p. 6-15, 2014.

MORI, S. A. SILVA, L.A.M.; LISBOA, G.; CORANDIN, L. **Manual de manejo do herbário fanerogâmico**. Ilhéus: Centro de Pesquisas do Cacau, 103p., 1989.

MOURA, H. P. de. et al. Avaliação da Qualidade da Água do Reservatório Poção, Monteiro/PB. *MIN: SEABRA, G. (Org.). Terra: Qualidade de Vida, Mobilidade e Segurança nas Cidades. João Pessoa: Editora Universitária da UFPB*, v. 3. p. 1119-1129, 2013.

MOURA, M. S. B.; GALVÍNCIO, J. D.; BRITO, L. T. L.; SOUZA, L. S. B.; SÁ, I. I. S. SILVA, T. G. F. Clima e água de chuva no semiárido. Capítulo de livro. cap. 2. p. 37-59. In: *BRITO, L. T. de L.; MOURA, M. S. B. de; GAMA, G. F. B. (Ed.). Potencialidades da água de chuva no Semiárido brasileiro*. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2007.

NASCIMENTO, E. C. **Variação espaço-temporal da comunidade fitoplanctônica em um reservatório eutrófico do semi-árido do Nordeste** (Pernambuco - Brasil). 92p. *Dissertação (Mestrado em Botânica) Universidade Federal Rural de Pernambuco*. Recife, PE, 2010.

NIAYIFAR, A.; PERONA, P. Dynamic water allocation policies improve the global efficiency of storage systems. **Advances in Water Resources**, v. 104, p. 55-64, 2017.

NOGUEIRA DA SILVA; Gérsica Moraes. Avaliação do aporte de nutrientes proveniente da piscicultura na alteração da qualidade da água diante de cenários de redução de vazão em reservatório no semiárido. *Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco*, Recife, 161 p., 2019.

NOORI, R.; BERNDTSSON, R.; HOSSEINZADEH, M.; ADAMOWSKI, J. F.; ABYANEH, M. R. A critical review on the application of the National Sanitation Foundation Water Quality Index. **Environ. Pollut.**, v. 244, p. 575-587, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.10.076>

OECD. **Governança dos Recursos Hídricos no Brasil**, OECD Publishing, Paris, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1787/9789264238169-pt> Acesso em: 02/09/2017.

OLIVEIRA, A. G. Impactos ambientais e sociais da Bacia Hidrográfica do rio Paraíba decorrentes do uso do solo e da transposição do rio São Francisco. *Tese de doutorado em Desenvolvimento e Meio Ambiente. João Pessoa-PB: UFPB*, 2018. 215p.

OLIVEIRA, Cláudia Ricardo de. Modelagem espaço-temporal e análise de cenários do uso da água para irrigação no trecho submédio da bacia hidrográfica do rio São Francisco. *Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco*, Recife, 198 p., 2019.

OLIVEIRA, C. Y. B.; OLIVEIRA, C. D. L.; ALMEIDA, J. G. A.; DANTAS, D. M. Phytoplankton responses to an extreme drought season: A case study at two reservoirs from a semiarid region, Northeastern Brazil. **Journal of Limnology**, v. 78(2): 176-184, 2019.

OLIVEIRA, Diego Bruno da Silva. O uso das tecnologias sociais hídricas na zona rural do semiárido paraibano: entre o combate a Seca e a convivência com o semiárido. *Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal da Paraíba – UFPB*, 186 p., 2015.

OLIVEIRA, Fabiano Custódio de. Alterações no sistema produtivo e organização do trabalho na agricultura irrigada em torno do açude de Boqueirão – PB. *Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Geografia da Universidade Federal da Paraíba*, João Pessoa, 181 p., 2007.

OLIVEIRA, Márcia Teixeira de. O fitoplâncton como instrumento de biomonitoramento da qualidade da água do Reservatório de Cachoeira Dourado – Rio Paraíba – GO/MG. *Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Recursos Naturais do Centro de Ciências Biológicas e da Saúde da Universidade Federal de São Carlos*. São Paulo, 2010.

ONU – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. 2015. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/pos2015/agenda2030/> Acesso em: 15/06/2019

OPPA, Lorenza Ferreira. Utilização de modelo matemático de qualidade da água para análise de alternativas de enquadramento do rio Vacacaí Mirim. *Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Maria*. 130 p., 2007.

PARAÍBA. GOVERNO DO ESTADO. Lei nº 6.308, de 02 de julho de 1996. Institui a Política Estadual de Recursos Hídricos, seus diretrizes e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, 02 de jul. Seção 1, p. 14., 1996.

PARAÍBA. GOVERNO DO ESTADO. Decreto nº 19.260, de 31 de outubro de 1997. Regulamenta a outorga do direito de uso dos recursos hídricos e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, 31 de out. 1997, Seção 1, p. 8., 1997.

PARAÍBA. GOVERNO DO ESTADO. **Proágua semiárido. Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do rio Paraíba**. Relatório Final. Volume I/Secretaria Extraordinária do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e Minerais – SEMARH, 2001.

PARAÍBA. Lei nº 7.779, de 07 de julho de 2005. Cria a Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba – AESA e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, João Pessoa - PB, 7 de julho de 2005, Seção 1, p. 8, 2005.

PARAÍBA. GOVERNO DO ESTADO. Secretaria de Estado da Ciência e Tecnologia e do Meio Ambiente – SECTMA. PERH-PB: *Plano Estadual de Recursos Hídricos: resumo executivo & atlas / Governo do Estado da Paraíba*; Secretaria de Estado da Ciência e Tecnologia e do Meio Ambiente, SECTMA; Agência Executiva de Gestão de Águas do Estado da Paraíba, AESA. – Brasília, DF : Consórcio TC/BR – Concremat, 2006a.

PARAÍBA. Decreto nº 27.560, de 04 de setembro de 2006. Cria o Comitê do Rio Paraíba. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, João Pessoa - PB, 5 de setembro de 2006, Seção 1, p. 6, 2006b.

PARAÍBA. GOVERNO DO ESTADO. **Nota técnica AESA/GEMOH: 001/2019**. Dispõe sobre as atualizações das curvas Cota x Área x Volume (CAV) com respectiva alteração dos volumes finais de reservatórios do Estado. Secretaria da Infraestrutura, dos Recursos Hídricos e do Meio ambiente, Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba – AESA. 3 p.3, 2019.

PAVÃO, Bianca Borges Medeiros; NASCIMENTO, Elimar Pinheiros do. Crise hídrica como unidade analítica sobre a regulação das águas brasileiras. **Revista de Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 52, p. 1 – 20, 2019.

PINTO, Gustavo Lima; JESUS, Ariel Ribeiro de; FERREIRA, Danieli Mara; MUHLENHOFF, Ana Paula; FERNANDES, Cristovão Vicente Scapulatempo. Séries históricas fluviométricas: avaliação do monitoramento na bacia do Alto Iguacu (PR). *In: Anais do XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Florianópolis, 8 p., 2017.

PÔMPEO, Marcelo. Monitoramento e manejo de macrófitas aquáticas. **Revista Oecol. Bras.**, n. 12, v. 3, p. 406-424, 2008.

POPOVSKÝ, J.; PFIESTER, L. Dinophyceae (Dinoflagellida). *In: Ettl, H., Gerloff, J., Heynig, H. & Mollenhauer, D. (orgs), Süßwasserflora von Mitteleuropa. Gustav Fischer, Jena. v.6, 272 p., 1990.*

PORTELA, Thiago José de Barros. Governança para operacionalização do Projeto de Integração do Rio São Francisco com Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional. *Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos, Universidade Federal de Pernambuco*, 199 p., 2021.

PORTO, R. L.; AZEVEDO, L. G. T. Sistema de Suporte a Decisão Aplicado a Problemas de Recursos Hídricos. *In: Técnicas quantitativas para o gerenciamento de recursos hídricos*. Org. por Porto, R. L., ABRH, ed. UFRGS, Porto Alegre - RS, pp. 43 – 95p., 1997.

PORTO, R. L. L.; ROBERTO, A. N.; SCHARDONG, A.; MÉLLO JÚNIOR, A. V. Sistema de suporte a decisão para análise de sistemas de recursos hídricos. *In: Silva, R. C. V. Métodos numéricos em recursos hídricos. Porto alegre: ABRH, 2003*. Cap. 2, p. 93 -240, 2003.

RAMOS, C. P. S.; LIRA, O. O.; LIRA, G. A. S. T. Cianobactérias em mananciais utilizados por sistemas autônomos de abastecimento de água e esgoto (SAAE) de municípios da Zona Mata Sul de Pernambuco. **Revista Vigil. Sanit. Debate**, v. 4, n.1, 20-26, 2016. DOI: 10.3395/2317-269x.00628.

RAMOS, Telton Pedro Anselmo; LUSTOSA-COSTA, Silvia Yasmin; LIMA, Railla Maria Oliveira; BARBOSA, José Etham de Lucena; MENEZES, Rosemberg Fernandes. First record of *Moenkhausia costae* (Steindachner 1907) in the Paraíba do Norte basin after the São Francisco River diversion. **Biota Neotropica**, 21(2): e20201049, 2021. <https://doi.org/10.1590/1676-0611-BN-2020-1049>

RÊGO, Janiro Costa; GALVÃO, Carlos de Oliveira; RIBEIRO, Márcia Maria Rios; ALBUQUERQUE, José do Patrocínio Tomaz; PEDROSA, Ricardo Nóbrega. O agravamento da crise hídrica no açude Boqueirão: riscos quali-quantitativos e de saúde pública. *In: Anais do XIII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste*, Aracaju, 10 p., 2016.

RÊGO, J. C.; GALVÃO, C. O.; ALBUQUERQUE, J. P. T.; RIBEIRO, M. M. R.; NUNES, T. H. C. A Gestão de Recursos Hídricos e a Transposição de Águas do Rio São Francisco para o Açude Epitácio Pessoa-Boqueirão. *In: Anais do Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Florianópolis, ABRH: 2017.

ROOBAVANNAN, M.; KANDASAMY. J.; PANDE, S.; VIGNESWARAN, S.; SIVAPALAN, M. Allocating environmental water and impact on basin unemployment: Role of a diversified economy. **Ecological Economics**, v. 136, p. 178-188, 2017.

ROSMAN, P.C.C. **Referência Técnica do SISBAHIA**. Rio de Janeiro, RJ: PUCRJ, 2005.

ROUSTA, B. A.; ARAGHINEJAD, S. Development of a multi criteria decision making tool for a water resources decision support system. **Water Resour Management**, v. 29, p. 5713–5727, 2015.

SALLA, Márcio Ricardo; ARQUIOLA, Javier Paredes; SOLERA, Abel; ANDREU, Joaquim Álvarez.; PEREIRA, Carlos Eugênio; ALAMY FILHO, José Eduardo; OLIVEIRA, André Luiz de. Sistema de suporte à decisão em recursos hídricos na bacia hidrográfica do rio Uberabinha, Minas Gerais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 1, p.189-204, 2014.

SANT'ANNA, C. L.; AZEVEDO, M. T. P.; AGUJARO, L. CARVALHO, L. R.; SOUZA, R. C. **Identificação e Contagem de Cianobactérias Planctônicas de Águas Continentais Brasileiras**. Ed. Interciência – Sociedade Brasileira de Ficologia. 55p., 2006.

SANTOS, Eliane Campos; VIANNA, Pedro Costa Guedes; SOUZA, Maria Cecilia Silva; RUFFO, Camila Leite de Melo. **Capacitação para a governança das águas através do mapeamento digital do diagnóstico hídrico nas cidades do Cariri paraibano**. *Anais: VII Congresso Brasileiro de Geógrafos*, Vitória –ES, 9 p., 2014.

SANTOS, I. V. Avaliação da qualidade da água do açude Epitácio Pessoa em relação ao nível de água acumulado no período de 2006 e 2016. *TCC - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande*, 2017.

SANTOS, P. V. C. J.; CUNHA, A. C. da. Outorga de recursos hídricos e vazão ambiental no Brasil: Perspectivas metodológicas frente ao desenvolvimento do setor hidrelétrico na Amazônia. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.18, n.3, p. 81-95, 2013.

SANTOS, V. da S.; CURI, W. F. Sustentabilidade do uso dos recursos hídricos do reservatório Epitácio Pessoa através de um Modelo de Otimização Multiobjetivo. **Revista de Administração, Contabilidade e Sustentabilidade**, v. 4, n. 3, p. 95 – 112, 2014.

SCHARDONG, A.; MÉLLO JÚNIOR, A. V.; ROBERTO, A. N.; PORTO, R. L. A. Desempenho do modelo Acquanetxl na alocação de água em sistemas de recursos hídricos complexos **Eng. Agríc., Jaboticabal**, v.29, n.4, p.705-715, out./dez., 2009.

SHIMIZU, Y., ONODERA, SI., JIN, G.; SAITO, MITSUYO. Effect of in-stream impoundment on the water quality of a suburban stream. **Limnology**, n. 21, p. 393-402, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10201-020-00619-x>

SHOUBAKY, G. A. Comparison of the Impacts of Climate Change and Anthropogenic Disturbances on the El Arish Coast and Seaweed Vegetation After Ten Years in 2010, North Sinai, Egypt, **Oceanologia**, v. 55, n. 3, p. 663-685, 2013.

SHOURIAN, M.; MOUSAVI, S. J. Performance assessment of a coupled particle swarm optimization and network flow programming model for optimum water allocation. **Water Resources Management**, v. 31, p. 4835–4853, 2017.

SHUMILOVA, O.; TOCKNER, K.; THIEME, M.; KOSKA, A.; ZARFL, C. Global Water Transfer Megaprojects: A Potential Solution for the Water-Food-Energy Nexus? **Front. Environ. Sci.** 6:150, 2018. doi: 10.3389/fenvs.2018.00150

SILVA, F. R. dos S., CAVALCANTE, F. L. P., AGOSTINHO, R. B., AZEVEDO, D. J. da S., BARBOSA, J. E. de L., CORDEIRO, R. da S. Comunidade fitoplanctônica como indicadora da qualidade ambiental em um trecho urbano do rio Jaguaribe, semiárido Cearense. **Gaia Scientia**, v. 13, n.1, p. 153 – 163, 2019.

SILVA, José Erivaldo da. Análise de viabilidade econômica da agricultura familiar dos arrendatários do DNOCS no açude de Boqueirão – PB. *Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento Regional da Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande*, 137 p., 2012.

SILVA, Maria Betânia Rodrigues; AZEVEDO, Pedro Vieira de; ALVES, Telma Lucia Bezerra. Análise da degradação ambiental no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba. **Bol. Goia. Geogr.**, Goiânia, v. 34, n. 1, p. 35-53, 2014.

SILVA, Maria Conceição Araújo Alves da. Modelagem matemática da qualidade da água como suporte ao enquadramento da bacia do rio Goiana-PE. *Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado Profissional em Tecnologia Ambiental do Instituto de Tecnologia de Pernambuco – ITEP*, 109 p., 2015.

SILVA, M. M. A. P. de M.; FARIA, S. D.; MOURA, P. M. Modelagem da qualidade da água na bacia hidrográfica do Rio Piracicaba (MG). **Eng Sanit Ambient**, v.22, n.1, P. 133-143, 2017. DOI: 10.1590/S1413-41522017134420

SILVA, R. D. dos S., SEVERIANO, J. dos S., OLIVEIRA, D. A. de., MENDES, C. F., BARBOSA, V. V., CHIA, M. A., BARBOSA, J. E. de L. Spatio-temporal variation of cyanobacteria and cyanotoxins in public supply reservoirs of the semi-arid region of Brazil. **J. Limnol.**, v. 79, n. 1, p.13-29, 2020. DOI: 10.4081/jlimnol.2019.1893

SIPAÚBA-TAVARES, L. H. **Limnologia Aplicada à Aquicultura**. Boletim Técnico do CAUNESP, n.1, Jaboticabal: FUNEP., 1994.

SOARES, Edmilson. Seca no Nordeste e a transposição do rio São Francisco. **Geografias – Artigos Científicos**, v. 9, n. 2, p. 75 – 86, 2013.

SOBRAL, M. do C.; CARVALHO, R. C.; FIGUEIREDO, R. C. Environmental risks management of multipurpose use of reservoirs in semiarid area of São Francisco River, Brazil. In: **GUNKEL, G.; SOBRAL, M.C. (Org.). Reservoirs and River Basins Management: Exchange of Experience from Brazil, Portugal and Germany**. Berlin: Technische Universität, TU Berlin, 2007.

SOBRAL, Maria do Carmo Martins. Estratégia de Gestão dos Recursos Hídricos no Semiárido Brasileiro. **Revista Eletrônica do PRODEMA – REDE**, v. 7, p. 76-82, 2011.

SOBRAL, Maria do Carmo; ASSIS, Janaína Maria Oliveira de; OLIVEIRA, Claudia Ricardo de; NOGUEIRA-SILVA, Gérsica M.; MORAIS, Manoela; CARVALHO, Renata Maria Caminha. Impacto das mudanças climáticas nos recursos hídricos no submédio da bacia hidrográfica do rio São Francisco – Brasil. **Revista Eletrônica do PRODEMA – REDE**, v. 12, n. 3, p.95-106. 2018.

SOUZA, Fernanda Abreu Oliveira de; OLIVEIRA, Mauro Márcio. Panorama dos danos humanos provocados por secas e cheias no Brasil e uma proposta de regionalização de investimentos na gestão de riscos. **Revista de Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 51, p. 282 – 310, 2019.

SOUZA, Rafael Siqueira. Simulação hidrodinâmica da qualidade da água. Estudo de caso: Ajuste do modelo CE-QUAL-W2 á sub-bacia do Arroio Demétrio, Bacia Hidrográfica do Rio Gravataí/RS. *Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul*, Porto Alegre, 144 p., 2006.

SOUZA, Stephanie de Oliveira; LIMA, Gustavo Ross Ribeiro; ALENCAR, Francisco Klayton Marques de; SILVA, Fernando José Araújo da. Avaliação da relação entre o índice de qualidade da água e o índice de estado trófico em reservatório do semiárido brasileiro. In: *Anais do IX Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais (IBEAS)*, 6p., 2018.

SUDEMA – SUPERINTENDÊNCIA DE ADMINISTRAÇÃO DO MEIO AMBIENTE. **DZS 205 – Enquadramento dos corpos d'água da bacia hidrográfica do rio Paraíba.** Sistema estadual de licenciamento de atividades poluidoras (SELAP), Paraíba, 7 p., 1988.

TERCINI, J. R. B; MÉLLO JUNIOR, A. V. Modelo de simulação de OD e DBO integrando rio e reservatório aplicado ao rio Tietê. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n.2, p. 338 – 346, 2016.

TERCINI, João; MELLO JUNIOR, Arisvaldo V. Cenarização da disponibilidade hídrica versus demanda de água utilizando o software AcquaNet: Estudo de caso bacia hidrográfica do Rio Piranhas-Açu. In: *XIV SRHNE - Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 2018, Maceió.* XIV SRHNE - Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 10 p., 2018.

TUCCI, Carlos E. M.; MENDES, Carlos André. **Avaliação ambiental integrada de bacia hidrográfica.** Ministério do Meio Ambiente/SQA – Brasília: MMA, 2006.

TUNDISI, José Galizia; MATSUMURA-TUNDISI, Takako. **Limnologia.** Ed. Oficina de Textos, 1ª ed., São Paulo, 632 p., 2008.

TUNDISI, José Galizia. Governança da água. **Rev. UFMG**, Belo Horizonte, v. 20, n.2, p. 222-235, 2013.

UDDIN, M. G.; NASH, S.; OLBERT, A. I. A review of water quality index models and their use for assessing surface water quality. **Ecological Indicators**, n. 122, 107218, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107218>

US BUREAU OF RECLAMATION. *Colorado-Big Thompson Project.* Disponível em: <<https://www.usbr.gov/projects/index.php?id=432>> Acesso em: 8 de junho de 2019.

UTERMÖHL, H. Zur vervollkommen der quantitativen phytoplankton methodic. Mitteilungen Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte. **Limnologie**, 9: 1-38. 1958.

VAN DEN HOEK, C.; MANN, D.G.; JAHNS, H.M. **Algae: an introduction to phycology.** Cambridge, Cambridge University Press. 1995.

VASCO, Anderson Nascimento do. Monitoramento, análise e modelagem da qualidade da água na sub-bacia do rio Poxim. *Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Agroecossistemas da Universidade Federal de Sergipe*, São Cristóvão, 158 p., 2011.

VESPUCCI, Ariel Godinho; SANTOS, Júnio Gregório Roza dos; BAYER, Maximiliano. Estações fluviométricas do estado de Goiás: qualificação dos dados hidrológicos disponíveis na base HIDROWEB/ANA. **Revista Ateliê Geográfico**, v. 10, n. 3, p. 89 – 108, 2016.

VICQ, Raphael de; LEITE, Mariangela Garcia Praça. Avaliação da implantação de fossas sépticas na melhoria na qualidade de águas superficiais em comunidades rurais. **Eng Sanit Ambient.** v.19, n.4, p. 411-416, 2014.

VON SPERLING, Marcos. **Lodos ativados.** Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, 416 p., 1997.

VON SPERLING, Marcos. **Introdução à qualidade das águas e tratamento de esgotos** – 3. Ed. – Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; UFMG, 452 p., 2005.

VON SPERLING, Marcos. **Estudo e modelagem da qualidade da água de rios**. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG (DESA). Belo Horizonte, 588p., 2007.

WANG, Ce; BI, Jun; AMBROSE JR, Robert B. Development and application of mathematical models to support total maximum daily load for the Taihu Lake's influent rivers, China, **Ecological Engineering**, v. 83, p. 258-267, 2015.

WIEGAND, M. C.; PIEDRA, J. I. G; ARAÚJO, J. C. Vulnerabilidade à eutrofização de dois lagos tropicais de climas úmidos (Cuba) e semiárido (Brasil). **Engenharia Sanitária e Ambiental**, vol.21 no.2 Rio de Janeiro. <http://dx.doi.org/10.1590/-41522016139527>. 2016.

WU, Tao; WANG, Shengrui; SU, Boalin; WU, Huaxin; WANG, Guoqiang. Understanding the water quality of the Yilong Lake based on comprehensive assessment methods. **Ecological Indicators**, n. 126, 107714, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107714>

WU, Y., WEN, Y., ZHOU, J.; WU, YUNYING. Phosphorus release from lake sediments: Effects of pH, temperature and dissolved oxygen. **KSCE J Civ Eng**, v. 18, p. 323-329, 2014. <https://doi.org/10.1007/s12205-014-0192-0>

XAVIER, Rafael Albuquerque; DORNELLAS, Patricia da Conceição; MACIEL, Jadson dos Santos; BÚ, José Cícero do. Caracterização do regime fluvial da Bacia hidrográfica do Rio Paraíba – PB. **Rev. Tamoios**, São Gonçalo (RJ), ano 08, n. 2, pags. 15-28., 2012.

ZAGATTO, P. A.; LORENZETTI, M. L.; LAMPARELLI, M. C.; SALVADOR, M. E. P.; MENEGON JÚNIOR, N. Q.; BERTOLETTI, E. Aperfeiçoamento de um índice de Qualidade de Águas. **Acta Limnologica Brasiliensia**, vol.11 (2), p. 111-129, 1999.

ZENG, Q.; QIN, L; LI, X. The potential impact of an interbasin water transfer project on nutrients (nitrogen and phosphorous) and chlorophyll a of the receiving water system. **Science of the Total Environment**, 536: 675–686, 2015.

ZHANG, M.; DOLATSHAH, A.; ZHU, W.; YU, G. Case study on water quality improvement in Xihu lake through diversion and water distribution. **Water**, v.10, p.333, 2018.

ZHAO, Z.Y.; ZUA, J.; ZILLANTE, G. Transformation of water resource management: a case study of the South-to-North Water Diversion project. **Journal of Cleaner Production**. v.163, p.136-145, 2017.

ZHUANG, W. Eco-environmental impact of inter-basin water transfer projects: a review. **Environmental Science and Pollution Research**, v.23, p. 12867–12879, 2016. DOI: 10.1007/s11356-016-6854-3

ZORZAL, Rogério. Sistema de suporte à decisão para análise de outorga de lançamento de efluentes de fontes pontuais em rios. *Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo*, Vitória/ES, 203 p., 2009.

APÊNDICE A – ARTIGOS SUBMETIDOS PARA PUBLICAÇÃO

Artigo submetido à Revista Acta Ambiental Catarinense

Data da submissão: 10/09/2021

Data de aceite: 28/03/2022

Status: Aguardando publicação

Acta Ambiental Catarinense

Autor et al.,

WATER QUALITY MONITORING AS A TOOL FOR SUSTAINABLE MANAGEMENT OF THE UPPER PARAÍBA RIVER COURSE MONITORAMENTO DA QUALIDADE DA ÁGUA COMO FERRAMENTA PARA GESTÃO SUSTENTÁVEL NO ALTO CURSO DO RIO PARAÍBA

XXX XXX XXX¹
XXX XXX XXX²
XXX XXX XXX³

Resumo

No semiárido nordestino as características climáticas e as pressões socioeconômicas associadas ao uso da água, contribuem para alterar a quantidade e a qualidade dessas águas nas bacias hidrográficas. Como alternativa para minimizar os problemas de déficit hídrico foi implantado o Projeto de Integração do rio São Francisco, que visa levar água da Bacia do rio São Francisco às bacias em quatro estados brasileiros, por meio dos Eixos Leste e Norte. Nesta pesquisa foi analisada a qualidade da água no Alto Curso do rio Paraíba, no Eixo Leste, através da avaliação dos parâmetros físico-químicos da água e dos índices de qualidade de água e de estado trófico, antes e após início da operação do projeto de integração. Entre os parâmetros analisados, o fósforo total, nitrogênio total, sólidos dissolvidos totais e demanda bioquímica de oxigênio, predominaram fora dos limites recomendados pela Legislação brasileira, tanto sazonalmente como ao longo do trecho estudado. Para os índices de qualidade de água e de estado trófico predominaram as classificações Boa e Eutrófica, respectivamente. A redução da vazão influenciou negativamente a qualidade da água. Com relação à chegada das águas do Projeto de Integração foi observado decréscimo na concentração do fósforo, clorofila-*a* e sólidos dissolvidos totais.

Palavras-chave: Recursos hídricos. Semiárido. Uso sustentável da água. Transposição de bacias.

Abstract

In the Northeastern semiarid, the climatic characteristics and the socioeconomic pressures associated with the use of water, contribute to altering the quantity and quality of these waters in the hydrographic basins. As an alternative to minimize water deficit problems, the São Francisco River Integration Project was implemented, which aims to bring water from the São Francisco River basin to basins in four Brazilian states, through the East and North Axes. In this research, the water quality in the Upper Paraíba River Course, in the East Exis, was analyzed through the evaluation of the physicochemical parameters of the water and the water quality and trophic status indexes, before and after the beginning of the operation of the project: integration. Among the parameters, total

¹Filiação do autor

²Filiação do autor

³Filiação do autor

DOI XXXXXXXXXXXXX

Vol. XX, N. XX (20XX)

Artigo submetido à Revista Ambiente e Água

Data da submissão: 08/01/2022

Data de aceite: -

Status: Aguardando 2ª avaliação

Page 1 of 15

Revista Ambiente & Água

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60

Modeling the Upper Course of the Paraíba river after integration with the São Francisco river

ABSTRACT

The Upper Course of the Paraíba river, located in the semi-arid northeastern Brazil, is a region marked by water scarcity and multiple conflicts over water uses. The Paraíba river basin is the recipient of waters from the Integration Project of the São Francisco river with Watersheds of the Northern Northeast. This project brings water from the São Francisco river to seven other basins in northeastern Brazil. In this sense, the AcquaNet decision support system was applied with the intention of providing information to subsidize actions in the control and monitoring of water quantity and quality, which are indispensable to guarantee a sustainable management of water resources. The tools applied will contribute to the efficient consumption for priority uses of water resources, as well as the maintenance of irrigated agriculture. From the simulated scenarios, it can be observed that the entry of the Project waters into the reservoirs increased the fulfilled percentage of water supply (Poções reservoir) and irrigation (Epitácio Pessoa reservoir) demands. It also contributed to reduce the biochemical oxygen demand and stabilize the dissolved oxygen concentrations in several stretches of the Upper Course Paraíba river. Furthermore, most of the time it maintained the concentrations of such water quality indicator parameters mentioned, as recommended by the Brazilian legislation for class 2 waters.

Key words: AcquaNet; multiple uses of water; water quality.

Modelagem do Alto Curso do Rio Paraíba após a integração com o Rio São Francisco

RESUMO

O Alto Curso do rio Paraíba, situado no semiárido nordestino, é uma região marcada pela escassez hídrica e conflitos pelos usos múltiplos da água. A bacia do rio Paraíba é receptora das águas do Projeto de Integração do Rio São Francisco com Bacias do Nordeste Setentrional, que leva água do rio São Francisco para outras sete bacias no nordeste brasileiro. Neste sentido, o sistema de suporte a decisão AcquaNet foi aplicado com intuito de trazer informações que subsidiem ações no controle e monitoramento da quantidade e qualidade das águas, preponderantes para garantia de uma gestão sustentável dos recursos hídricos. As ferramentas aplicadas vêm a contribuir com o consumo eficiente dos recursos hídricos pelos usos prioritários, bem como, na manutenção da atividade de agricultura irrigada. A partir dos cenários simulados, pode-se observar que, a entrada das águas do Projeto nos reservatórios aumentou o percentual de atendimento as demandas de abastecimento público (reservatório Poções) e irrigação (reservatório Epitácio Pessoa), e contribui para reduzir a demanda bioquímica de oxigênio e estabilizar as concentrações de oxigênio dissolvido em vários trechos no Alto Curso do rio Paraíba. Além de manter, em maior parte do tempo, as concentrações de tais parâmetros indicadores da qualidade da água mencionados acima, conforme recomendado pela legislação brasileira para águas de classe 2.

Palavras-chave: AcquaNet; qualidade da água; usos múltiplos da água.

Artigo submetido à Revista Humanidades & Inovação

Data da submissão: 10/12/2021

Data de aceite: -

Status: Aguardando avaliação

MONITORAMENTO DA COMUNIDADE FITOPLANCTÔNICA COMO FERRAMENTA PARA GESTÃO SUSTENTÁVEL DA ÁGUA EM BACIA INTEGRANTE DO PROJETO DE INTEGRAÇÃO DO RIO SÃO FRANCISCO
MONITORING THE PHYTOPLANKTONIC COMMUNITY AS A TOOL FOR SUSTAINABLE WATER MANAGEMENT IN THE BASIN PART OF THE SÃO FRANCISCO RIVER INTEGRATION PROJECT

Resumo:

O estudo avaliou a qualidade da água no Alto Curso do rio Paraíba, inserido no Eixo Leste do Projeto de Integração do rio São Francisco, antes e após a interligação das bacias, no período de 2011 a 2019, considerando o fitoplâncton como bioindicador da qualidade da água. O projeto de transposição de bacias foi desenvolvido para minimizar o déficit hídrico no semiárido nordestino e o monitoramento da qualidade da água é fundamental para uma gestão integrada e sustentável. As Cyanobacteria foram mais expressivas em relação aos demais grupos e dominou o ambiente de estudo, apresentando concentrações acima do limite recomendado pela legislação brasileira e espécies potencialmente produtoras de cianotoxinas. Verificou-se que o pH e os sólidos dissolvidos totais vem influenciando a predominância das Cyanobacteria. A DBO, nitrogênio, fósforo, turbidez e sólidos dissolvidos totais não atenderam às exigências da legislação brasileira vigente, destacando o fósforo acima dos limites durante todo monitoramento.

Palavras-chave: Fitoplâncton; bioindicador; transposição de bacias; qualidade de água; semiárido.

Abstract:

The study evaluated the water quality in the Upper Paraíba River Course, inserted in the East Axis of the São Francisco River Integration Project, before and after the interconnection of the basins, in the period from 2011 to 2019, considering phytoplankton as a bioindicator of the quality of the Water. The basin transposition project was developed to minimize the water deficit in the semi-arid region of the Northeast and water quality monitoring is essential for an integrated and sustainable management. Cyanobacteria were more expressive in relation to the other groups and dominated the study environment, with concentrations above the limit recommended by Brazilian legislation and species potentially producing cyanotoxins. It was found that pH and total dissolved solids have influenced the predominance of Cyanobacteria. BOD, nitrogen, phosphorus, turbidity and total dissolved solids did not meet the requirements of current Brazilian legislation, highlighting phosphorus above limits during all monitoring.

Keywords: Phytoplankton; bioindicator; basin transposition; water quality; semiarid.

Introdução

O estado da Paraíba sofre com longos períodos de estiagem, que associados às elevadas demandas para os diferentes usos, resultam na diminuição progressiva das águas acumuladas nos reservatórios. Assim, em longos períodos de seca, são comuns problemas relacionados ao abastecimento das cidades, com a adoção de medidas de racionamento das águas; problemas de qualidade das águas em função dos