



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

HIDAIANE FAYGA MATIAS CALDAS

**ANÁLISE DA EVOLUÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DA QUALIDADE DA ÁGUA NO
EIXO LESTE DO PROJETO DE INTEGRAÇÃO DO RIO SÃO FRANCISCO**

Recife

2021

HIDAIANE FAYGA MATIAS CALDAS

**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, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

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

Recife

2021

Catálogo na fonte
Sandra Maria Neri Santiago, CRB-4 / 1267

C145a Caldas, Hidaiane Fayga Matias
Análise da evolução espaço-temporal da qualidade da água no eixo leste do projeto de integração do Rio São Francisco / Hidaiane Fayga Matias
Caldas. – Recife, 2021.
133 f.: figs., tabs.

Orientador: Prof^a. Dr^a. Maria do Carmo Martins Sobral.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2021.
Inclui referências, apêndices e anexos.

1. Engenharia Civil. 2. Recursos Hídricos. 3. Semiárido. 4. Poluição da Água. 5. Estatística Multivariada. I. Sobral, Maria do Carmo (Orientadora). II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.) BCTG / 2021 - 133

HIDAIANE FAYGA MATIAS CALDAS

**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, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Aprovada em: 11/02/2021.

BANCA EXAMINADORA

participação por videoconferência
Prof^ª. Dr^ª. Maria do Carmo Martins Sobral (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

participação por videoconferência
Prof^ª. Dr^ª. Maristela Casé Costa Cunha (Examinadora externa)
Universidade do Estado da Bahia

participação por videoconferência
Prof^ª. Dr^ª. Suzana Maria Gico Lima Montenegro (Examinadora interna)
Universidade Federal de Pernambuco

À minha família e meus amigos, que foram meu apoio durante essa jornada, e contribuem para o meu crescimento pessoal a cada dia.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Carlos (*In memoriam*) e Hidelvania, por toda a força, apoio e incentivo na busca dos meus objetivos. À minha irmã Hithalla e ao meu sobrinho Carlos Neto que a cada dia me ensinam a compartilhar momentos e valores. Agradeço à minha avó Emília e aos meus tios Marcílio e Matsuzuk pela noção de família que demonstram a mim. Aos demais familiares por todo o estímulo nos momentos de conquistas e dificuldades.

Agradeço especialmente à minha professora orientadora Dr^a Maria do Carmo Sobral, a quem tenho profunda admiração, pela confiança e oportunidade de trabalhar com sua equipe, além de todo o conhecimento compartilhado.

A todos os companheiros do Grupo de Gestão Ambiental que estiveram junto a mim durante essa jornada: Ariane Cardoso, Janaina Assis, Joelma Ferreira, Gérsica Nogueira, Oziel Pedrosa, Douglas Brandão, Cláudia Oliveira, Érika Marques, Athos Farias, Camylla Rebeca e Tatyane Guimarães.

Aos bons amigos que fiz durante as disciplinas do mestrado, os quais tenho muito carinho: Alynne Soares, Isabelle Câmara, Luiz Pereira, Samara Fernanda e Italcly Júnior.

Aos membros da banca examinadora: Prof^a. Dr^a. Suzana Montenegro e Prof^a. Dr^a. Maristela Casé, pela colaboração no enriquecimento desta pesquisa.

À Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), aos professores e secretárias do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), por toda a colaboração ao longo do tempo de construção deste trabalho.

À Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) pelo financiamento da bolsa de estudos que possibilitou a realização deste mestrado.

Ao Ministério do Desenvolvimento Regional (ex Ministério da Integração Nacional) e à CMT Engenharia, por disponibilizarem o uso dos dados de qualidade da água.

Minha profunda gratidão a todas as pessoas e instituições públicas e privadas que contribuíram direta ou indiretamente para o desenvolvimento dessa pesquisa.

RESUMO

Na região semiárida do Brasil, os conflitos ocasionados pelos usos múltiplos da água são agravados pelos eventos climáticos extremos e o déficit hídrico recorrente. Para aumentar a disponibilidade hídrica na região, foi implantado o Projeto de Integração do rio São Francisco com as Bacias do Nordeste Setentrional (PISF), executado pelo atual Ministério do Desenvolvimento Regional. O empreendimento visa transferir, por meio dos eixos Norte e Leste, água da bacia do rio São Francisco para bacias do semiárido, a fim de garantir segurança hídrica a 12 milhões de pessoas nos estados de Pernambuco, Paraíba, Rio Grande do Norte e Ceará. O objetivo geral desta pesquisa foi analisar a evolução espaço-temporal da qualidade da água ao longo do Eixo Leste do PISF. Foram utilizados resultados de 21 parâmetros físicos, químicos e biológicos, correspondentes a 19 estações de monitoramento da qualidade da água ao longo do eixo, percorrendo desde a captação, os reservatórios projetados entre os canais, até açudes receptores das águas do projeto, coletados entre 2014 e 2019. Os reservatórios da bacia do Paraíba apresentaram piores níveis de violação dos limites recomendados pela Resolução CONAMA 357/2005, além de uma melhoria na qualidade das águas dessa bacia após o início da pré-operação do Eixo Leste em 2017, particularmente nas variáveis salinidade, condutividade elétrica e alcalinidade total. Os resultados do IQA e IET corroboraram a diferenciação entre as condições de qualidade da água da bacia doadora e receptora, além de apontar sua melhoria, principalmente nas estações correspondentes a ambientes lóticos. A aplicação da estatística multivariada aos dados demonstrou alta participação de variáveis de origem mineralógica e relacionadas com a poluição de origem antropogênica nas águas do Eixo Leste, além de indicar similaridade entre as águas da captação e dos reservatórios projetados, denotando a não ocorrência de grandes alterações na qualidade da água ao longo do percurso do eixo antes de atingir a bacia receptora. A repartição das vazões destinadas à Paraíba e Pernambuco no Plano de Gestão Anual do PISF revelou uma diferenciação nos volumes recebidos pelos dois estados, além da distribuição irregular dos valores ao longo do ano no estado da Paraíba. São recomendadas medidas de controle da poluição e do uso do solo nas proximidades dos reservatórios, a parceria entre as instituições que realizam o controle ambiental, além do reforço na educação ambiental da população para garantir a qualidade e uso sustentável e racional dos recursos hídricos do PISF.

Palavras-chave: recursos hídricos; semiárido; poluição da água; estatística multivariada.

ABSTRACT

In the semi-arid region of Brazil, conflicts caused by multiple uses of water are aggravated by extreme weather events and the recurrent water deficit. In order to increase water availability in the region, the Integration Project of the São Francisco River with the Basins of the Northern Northeast (PISF), introduced by the current Ministry of Regional Development, was implemented. The project aims to transfer, through the North and East axes, water from the São Francisco River basin to the semi-arid basins, in order to guarantee water security to 12 million people in the states of Pernambuco, Paraíba, Rio Grande do Norte and Ceará. The general objective of this research was to analyze the spatio-temporal evolution of water quality along the Eastern Axis of the PISF. Results from 21 physical-chemical and biological parameters were used, corresponding to 19 water quality monitoring stations along the axis, running from the catchment, the projected reservoirs between the channels, to the reservoirs receiving the water from the project, collected between 2014 and 2019. The Paraíba basin reservoirs showed worse levels of violation of the limits recommended by the CONAMA 357/2005 resolution, besides an improvement in the water quality of that basin after the beginning of the pre-operation of the Eastern Axis in 2017, particularly in the variables salinity, electrical conductivity and total alkalinity. The results of the IQA and IET corroborated the differentiation between the water quality conditions of the donor and recipient basins, in addition to pointing out the improvement, mainly in the monitoring station corresponding to lotic environments. The application of multivariate statistics to the data demonstrated a high participation of variables of mineralogical origin and related to pollution of anthropogenic origin in the waters of the Eastern Axis, in addition to indicating similarity between the catchment waters and the projected reservoirs, denoting the absence of major changes in water quality along the axis path before reaching the receiving basin. The distribution of flows destined for Paraíba and Pernambuco in the PISF Annual Management Plan revealed a differentiation in the volumes received by the two states, in addition to the irregular distribution of values throughout the year in the state of Paraíba. Measures to control pollution and land use in the vicinity of reservoirs are recommended, as well as the partnership between institutions that carry out environmental control, in addition to strengthening environmental education for the population to guarantee the quality and sustainable and rational use of PISF water resources.

Keywords: water resources; semi-arid; water pollution; multivariate statistics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Objetivos do Desenvolvimento Sustentável estabelecidos na Agenda 2030.....	22
Figura 2 -	Principais fatos históricos da gestão de recursos hídricos no Brasil.....	25
Figura 3 -	Matriz institucional dos integrantes do SINGREH em 2019.....	27
Figura 4 -	Localização dos eixos do Projeto de Integração do Rio São Francisco.....	34
Figura 5 -	Classes de enquadramento dos corpos de água doce segundo os seus usos.....	39
Figura 6 -	Localização do Eixo Leste do PISF.....	44
Figura 7 -	Diagrama esquemático do Eixo Leste do PISF.....	46
Figura 8 -	Localização das bacias do Eixo Leste do PISF.....	48
Figura 9 -	Localização das estações de monitoramento da qualidade da água avaliadas nesta pesquisa ao longo do Eixo Leste.....	50
Figura 10 -	Variação da temperatura da água nos pontos amostrais das bacias hidrográficas GI3, do rio Moxotó, do rio Pajeú e do rio Paraíba, nos períodos chuvosos e secos dos anos de 2014 a 2019.....	61
Figura 11 -	Variação do pH nos pontos amostrais das bacias hidrográficas GI3, do rio Moxotó, do rio Pajeú e do rio Paraíba, nos períodos chuvosos e secos dos anos de 2014 a 2019.....	62
Figura 12 -	Variação da turbidez nos pontos amostrais das bacias hidrográficas GI3, do rio Moxotó, do rio Pajeú e do rio Paraíba, nos períodos chuvosos e secos dos anos de 2014 a 2019.....	63
Figura 13 -	Variação da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) nos pontos amostrais das bacias hidrográficas GI3, do rio Moxotó, do rio Pajeú e do rio Paraíba, nos períodos chuvosos e secos dos anos de 2014 a 2019.....	64
Figura 14 -	Variação do oxigênio dissolvido (OD) nos pontos amostrais das bacias hidrográficas GI3, do rio Moxotó, do rio Pajeú e do rio Paraíba, nos períodos chuvosos e secos dos anos de 2014 a 2019.....	66

Figura 15 -	Variação da demanda química de oxigênio (DQO) nos pontos amostrais das bacias hidrográficas GI3, do rio Moxotó, do rio Pajeú e do rio Paraíba, nos períodos chuvosos e secos dos anos de 2014 a 2019.....	67
Figura 16 -	Variação da salinidade nos pontos amostrais das bacias hidrográficas GI3, do rio Moxotó, do rio Pajeú e do rio Paraíba, nos períodos chuvosos e secos dos anos de 2014 a 2019.....	68
Figura 17 -	Variação da condutividade elétrica nos pontos amostrais das bacias hidrográficas GI3, do rio Moxotó, do rio Pajeú e do rio Paraíba, nos períodos chuvosos e secos dos anos de 2014 a 2019.....	69
Figura 18 -	Variação da dureza total nos pontos amostrais das bacias hidrográficas GI3, do rio Moxotó, do rio Pajeú e do rio Paraíba, nos períodos chuvosos e secos dos anos de 2014 a 2019.....	70
Figura 19 -	Variação da alcalinidade total nos pontos amostrais das bacias hidrográficas GI3, do rio Moxotó, do rio Pajeú e do rio Paraíba, nos períodos chuvosos e secos dos anos de 2014 a 2019.....	71
Figura 20 -	Variação dos sólidos dissolvidos totais nos pontos amostrais das bacias hidrográficas GI3, do rio Moxotó, do rio Pajeú e do rio Paraíba, nos períodos chuvosos e secos dos anos de 2014 a 2019.....	72
Figura 21 -	Variação dos sólidos suspensos totais nos pontos amostrais das bacias hidrográficas GI3, do rio Moxotó, do rio Pajeú e do rio Paraíba, nos períodos chuvosos e secos dos anos de 2014 a 2019.....	73
Figura 22 -	Variação dos coliformes termotolerantes nos pontos amostrais das bacias hidrográficas GI3, do rio Moxotó, do rio Pajeú e do rio Paraíba, nos períodos chuvosos e secos dos anos de 2014 a 2019.....	74
Figura 23 -	Variação da clorofila-a nos pontos amostrais das bacias hidrográficas GI3, do rio Moxotó, do rio Pajeú e do rio Paraíba, nos períodos chuvosos e secos dos anos de 2014 a 2019.....	75
Figura 24 -	Variação da feofitina-a nos pontos amostrais das bacias hidrográficas GI3, do rio Moxotó, do rio Pajeú e do rio Paraíba, nos períodos chuvosos e secos dos anos de 2014 a 2019.....	76
Figura 25 -	Variação do fósforo total nos pontos amostrais das bacias hidrográficas GI3, do rio Moxotó, do rio Pajeú e do rio Paraíba, nos	

	períodos chuvosos e secos dos anos de 2014 a 2019.....	77
Figura 26 -	Variação do fósforo reativo solúvel nos pontos amostrais das bacias hidrográficas GI3, do rio Moxotó, do rio Pajeú e do rio Paraíba, nos períodos chuvosos e secos dos anos de 2014 a 2019.....	78
Figura 27 -	Variação do nitrogênio total nos pontos amostrais das bacias hidrográficas GI3, do rio Moxotó, do rio Pajeú e do rio Paraíba, nos períodos chuvosos e secos dos anos de 2014 a 2019.....	79
Figura 28 -	Variação do nitrogênio amoniacal nos pontos amostrais das bacias hidrográficas GI3, do rio Moxotó, do rio Pajeú e do rio Paraíba, nos períodos chuvosos e secos dos anos de 2014 a 2019.....	80
Figura 29 -	Variação do nitrito nos pontos amostrais das bacias hidrográficas GI3, do rio Moxotó, do rio Pajeú e do rio Paraíba, nos períodos chuvosos e secos dos anos de 2014 a 2019.....	81
Figura 30 -	Variação do nitrato nos pontos amostrais das bacias hidrográficas GI3, do rio Moxotó, do rio Pajeú e do rio Paraíba, nos períodos chuvosos e secos dos anos de 2014 a 2019.....	82
Figura 31 -	Matriz de correlação de Pearson das variáveis estudadas.....	92
Figura 32 -	Gráfico de sedimentação da PCA aplicada às variáveis estudadas.....	95
Figura 33 -	Biplot das PC1 e PC2 correspondente aos dados de qualidade da água do PISF com unidades classificadas por bacia hidrográfica (A) e de acordo com a ordem na matriz de dados (B).....	97
Figura 34 -	Dendrograma resultante da Análise de Agrupamentos aplicada aos dados de qualidade da água do PISF no período chuvoso.....	99
Figura 35 -	Dendrograma resultante da Análise de Agrupamentos aplicada aos dados de qualidade da água do PISF no período seco.....	100
Figura 36 -	Estrutura do Sistema de Gestão do Projeto de Integração do Rio São Francisco com as Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional (SGIB).....	101
Figura 37 -	Vazões mínimas e máximas distribuídas pelo PISF para a Paraíba no ano de 2021.....	104
Figura 38 -	Vazões mínimas e máximas distribuídas pelo PISF para Pernambuco no ano de 2021.....	105

Figura 39 - Vazões previstas mínimas distribuídas pelo PISF para Pernambuco nos anos de 2022 e 2023.....	105
--	-----

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 -	Descrição dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável.....	22
Quadro 2 -	Impactos ambientais e socioeconômicos observados em transferências de água entre bacias.....	28
Quadro 3 -	Reservatórios do Eixo Norte do PISF.....	35
Quadro 4 -	Reservatórios do Eixo Leste do PISF.....	35
Quadro 5 -	Significado ambiental das variáveis de qualidade da água.....	40
Quadro 6 -	Exemplos de estudos dos impactos do South-North Water Diversion Project (SNWDP) na qualidade da água.....	42
Quadro 7 -	Exemplos de estudos dos impactos do Shoalhaven System na qualidade da água.....	43
Quadro 8 -	Características dos reservatórios projetados do Eixo Leste do PISF.....	47
Quadro 9 -	Características dos açudes da bacia do rio Paraíba.....	48
Quadro 10 -	Estações de amostragem selecionadas, suas localizações e respectivos tipos de ambientes onde se encontram.....	49
Quadro 11 -	Variáveis físico-químicas e biológicas de campo e de laboratório com suas respectivas metodologias de análise.....	51
Quadro 12 -	Campanhas de monitoramento da qualidade da água do Eixo Leste do PISF analisadas na pesquisa, incluindo as datas e o clima no período das coletas.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Parâmetros de qualidade da água utilizados na pesquisa que possuem valores máximos permitidos de acordo com a Resolução CONAMA nº 357/2005.....	52
Tabela 2 -	Peso relativo dos parâmetros utilizados no Índice de Qualidade de Água.....	54
Tabela 3 -	Categorias e valores de ponderação resultantes do cálculo do Índice de Qualidade da Água – IQA.....	54
Tabela 4 -	Classificação do Estado Trófico para rios.....	56
Tabela 5 -	Classificação do Estado Trófico para reservatórios.....	56
Tabela 6 -	Valores do Índice de Qualidade da Água obtidos para as estações localizadas na bacia GI 3.....	83
Tabela 7 -	Valores do Índice de Estado Trófico obtidos para as estações localizadas na bacia GI 3.....	84
Tabela 8 -	Valores do Índice de Qualidade da Água obtidos para as estações localizadas na bacia do Rio Pajeú.....	85
Tabela 9 -	Valores do Índice de Estado Trófico obtidos para as estações localizadas na bacia do Rio Pajeú.....	86
Tabela 10 -	Valores do Índice de Qualidade da Água obtidos para as estações localizadas na bacia do Rio Moxotó.....	87
Tabela 11 -	Valores do Índice de Estado Trófico obtidos para as estações localizadas na bacia do Rio Moxotó.....	87
Tabela 12 -	Valores do Índice de Qualidade da Água obtidos para as estações localizadas na bacia do Rio Paraíba.....	89
Tabela 13 -	Valores do Índice de Estado Trófico obtidos para as estações localizadas na bacia do Rio Paraíba.....	90
Tabela 14 -	Componentes principais, autovalores, porcentagens de variância explicada e acumulada para as amostras avaliadas do monitoramento da qualidade da água do PISF.....	94
Tabela 15 -	Matriz das cargas das variáveis estudadas em relação às cinco primeiras componentes principais encontradas.....	95
Tabela 16 -	Resultados das análises de qualidade da água realizadas para as campanhas 16 a 25 do PISF.....	123

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AESA	Agência Executiva de Gestão das Águas da Paraíba
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
CAGEPA	Companhia de Águas e Esgotos da Paraíba
CE	Ceará
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
CODEVASF	Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba
COMPESA	Companhia Pernambucana de Saneamento
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
GGA	Grupo de Gestão Ambiental
GI 3	Grupo de bacias de pequenos rios interiores 3
IBAMA	Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis
IET	Índice de Estado Trófico
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
IQA	Índice de Qualidade das Águas
LHWP	Lesotho Highlands Water Project
MAXVER	Máxima Verossimilhança
MDR	Ministério do Desenvolvimento Regional
NSF	National Sanitation Foundation
OD	Oxigênio Dissolvido
ODS	Objetivos do Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
PACUERA	Plano Ambiental de Conservação e Uso do Entorno de Reservatório Artificial
PB	Paraíba
PBA	Programa Básico Ambiental
PE	Pernambuco
PGA	Plano de Gestão Anual do PISF
pH	Potencial Hidrogeniônico

PISF	Projeto de Integração do rio São Francisco com bacias hidrográficas do Nordeste Setentrional
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
POA	Plano Operativo Anual
PRH	Plano de Recursos Hídricos
PT	Fósforo total
SABESP	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
SGIB	Sistema de Gestão do Projeto de Integração do Rio São Francisco com as Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional
SIAA	Sistemas Isolados de Abastecimento de Água
SNSH	Secretaria Nacional de Segurança Hídrica
SINGREH	Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos
SNIRH	Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos
SNWDP	South-North Water Diversion Project
SMHS	Snowy Mountains Hydroelectric Scheme
SP	São Paulo
TCU	Tribunal de Contas da União
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	APRESENTAÇÃO DA AUTORA	18
1.2	JUSTIFICATIVA	18
1.3	OBJETIVOS	20
1.3.1	Objetivo geral	20
1.3.2	Objetivos específicos	20
2	REFERENCIAL TEÓRICO	21
2.1	GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS	21
2.1.1	Gestão de Recursos Hídricos no Brasil	24
2.2	PROJETOS DE TRANSFERÊNCIA DE ÁGUA ENTRE BACIAS HIDROGRÁFICAS.....	27
2.2.1	Experiências internacionais	29
2.2.2	Experiências nacionais	31
2.3	O PROJETO DE INTEGRAÇÃO DO RIO SÃO FRANCISCO COM BACIAS DO NORDESTE SETENTRIONAL (PISF)	32
2.4	AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA.....	36
2.4.1	Efeitos da transferência entre bacias na qualidade da água	42
3	METODOLOGIA	44
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	44
3.2	AMOSTRAGEM E ANÁLISES DA QUALIDADE DA ÁGUA	49
3.3	CÁLCULO DOS ÍNDICES PARA AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA	53
3.3.1	Índice de Qualidade da Água (IQA)	53
3.3.2	Índice de Estado Trófico (IET)	55
3.4	ANÁLISE ESTATÍSTICA MULTIVARIADA	56
3.4.1	Análise de Componentes Principais (ACP)	57
3.4.2	Análise de Agrupamentos	58
3.5	ANÁLISE DA GESTÃO AMBIENTAL E DE RECURSOS HÍDRICOS NO EIXO LESTE	59
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	60
4.1	ANÁLISE DOS PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS	60
4.2	ÍNDICE DE QUALIDADE DA ÁGUA E ÍNDICE DE ESTADO TRÓFICO	82
4.2.1	Bacia GI 3	83
4.2.2	Bacia do Rio Pajeú	85
4.2.3	Bacia do Rio Moxotó	86
4.2.4	Bacia do Rio Paraíba	88
4.3	ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS	92

4.4	ANÁLISE DE AGRUPAMENTOS.....	98
4.5	ANÁLISE DA GESTÃO AMBIENTAL E DE RECURSOS HÍDRICOS NO EIXO LESTE.....	101
4.5.1	Licenças ambientais	102
4.5.2	Outorgas de uso da água.....	103
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	107
5.1	CONCLUSÕES.....	107
5.2	RECOMENDAÇÕES	109
	REFERÊNCIAS	111
	APÊNDICE A - ARTIGO ACEITO PARA PUBLICAÇÃO.....	122
	ANEXO A - DADOS DE QUALIDADE DA ÁGUA.....	123
	ANEXO B - LICENÇA PRÉVIA Nº 200/2005	127
	ANEXO C - LICENÇA DE OPERAÇÃO Nº 1464/2018	131

1 INTRODUÇÃO

Nesta seção será realizada uma breve apresentação da autora, seguida da justificativa da temática escolhida para o desenvolvimento desta pesquisa e seus objetivos.

1.1 APRESENTAÇÃO DA AUTORA

A autora possui curso técnico em Desenvolvimento de Software pelo Instituto Federal do Piauí (IFPI) (2011), graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) (2016) e Especialização em Gerenciamento de Obras pela UNIFIP Centro Universitário (2020). Seu interesse na área de Recursos Hídricos e Saneamento teve início durante a graduação, onde realizou estudo sobre assoreamento em açudes urbanos, tendo como estudo de caso o Açude Velho, em Campina Grande/PB.

Atualmente é bolsista de mestrado da Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco (FACEPE) e atua no Programa de Monitoramento de Qualidade de Água e Limnologia (PBA-22) do Projeto de Integração do Rio São Francisco com Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional, financiado pelo Ministério do Desenvolvimento Regional. Possui conhecimentos e grande interesse em Análise de Dados com a Linguagem R e Sensoriamento Remoto através do software QGIS.

1.2 JUSTIFICATIVA

A água é um bem que serve como elo entre a sociedade e o meio ambiente. Sua posição é central para o desenvolvimento sustentável e tem um papel crítico no progresso socioeconômico, na produção de energia e alimentos, na manutenção de ecossistemas saudáveis, além da própria sobrevivência humana (UN, 2020). No entanto, as populações e suas demandas de consumo de água cada vez mais expressivas, não são distribuídas de acordo com a disponibilidade de recursos hídricos.

Um exemplo dessa situação pode ser visto no Semiárido brasileiro, região que possui uma variabilidade climática natural que não favorece o bem-estar econômico da maioria de sua população, e onde o crescimento populacional, as mudanças no uso da terra e a crescente busca por melhorias na qualidade de vida colocam em risco os recursos naturais. Os frequentes períodos de secas prolongadas impactam diretamente a vida dos residentes, que são forçados a recorrer a fontes alternativas de água (AZEVEDO et al., 2017).

O Projeto de Integração do Rio São Francisco com Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional (PISF) surgiu como uma alternativa de convivência com a escassez experimentada pelo Semiárido, comprometendo-se a garantir a oferta de água para cerca de 12 milhões de pessoas. Através de dois canais artificiais principais, denominados Eixo Norte e Eixo Leste, e seus ramais associados, serão levadas parte das águas do rio São Francisco que irão beneficiar áreas que padecem pela seca nos estados de Pernambuco, Paraíba, Rio Grande do Norte e Ceará (MI, 2004).

O Eixo Leste encontra-se em pré-operação desde 2017, e suas águas muito beneficiaram a bacia do rio Paraíba, que enfrentava um contexto de secas prolongadas, com seus reservatórios geralmente em estado crítico. Dentre eles, o reservatório Epitácio Pessoa (conhecido como Boqueirão), é o principal responsável pelo abastecimento de 17 cidades, incluindo Campina Grande com mais de 400 mil habitantes, já operou em seu volume morto de armazenamento, com um risco iminente de colapso (FARIAS; CURI; DINIZ, 2017).

Sendo, dessa forma, o PISF uma intervenção decisiva na garantia da segurança hídrica da região, é fundamental que também seja assegurada a qualidade de suas águas. Assim, como uma condicionante do Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) para o processo de licenciamento ambiental do projeto, foi previsto o Programa de Monitoramento da Qualidade da Água e Limnologia (PBA 22) do PISF.

O monitoramento da qualidade da água é de extrema importância para o entendimento da situação atual dos recursos hídricos e reflete as principais mudanças ocorridas ao longo do tempo. A avaliação dos dados do monitoramento é essencial na gestão dos recursos hídricos, pois auxilia na compreensão dos inúmeros processos que afetam a qualidade da água, permitindo o planejamento de intervenções de melhorias, identificando pontos de degradação, subsidiando a fiscalização e formulação de políticas ambientais (COSTA et al., 2017; CALAZANS et al., 2018).

As propriedades da água dos sistemas de água doce são controladas pela variabilidade climática, influências hidrológicas, biogeoquímicas e antropogênicas. Essas influências podem ser verificadas em escalas espaciais (por exemplo, global, bacia hidrográfica, bacia hidrográfica local) e temporais (MOSLEY, 2015). As águas disponíveis para o consumo humano em seus diversos usos são afetadas pelas atividades industriais, domésticas e agrícolas, sendo a eutrofização um dos maiores problemas globais de poluição hídrica, causada principalmente por entradas excessivas de nitrogênio e fósforo provenientes das práticas no seu entorno (ZOU et al., 2014; GUNKEL et al., 2018).

Neste cenário, esta pesquisa busca investigar as seguintes questões: a qualidade das águas transferidas por meio do Eixo Leste do Projeto de Integração do Rio São Francisco para a bacia do rio Paraíba, e estão sendo destinadas principalmente ao abastecimento humano, é satisfatória? As águas da bacia do São Francisco estão modificando as propriedades físico-químicas do ambiente receptor?

A existência do monitoramento constante das águas do PISF, através da análise de parâmetros físicos, químicos e biológicos, poderá indicar possíveis alterações da qualidade da água e direcionar as medidas necessárias para reduzir esses impactos. Por se tratar de um projeto que envolve altos custos em todas as suas etapas, e ser, como antes exposto, de fundamental importância para a garantia da oferta de água no Semiárido, é necessário que seja feito um bom uso desses recursos assegurando assim os usos múltiplos e a conservação dos ambientes aquáticos através da avaliação da eficiência e efetividade de sua conjuntura.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

Analisar a evolução espaço-temporal da qualidade da água ao longo do Eixo Leste do Projeto de Integração do Rio São Francisco com Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional - PISF.

1.3.2 Objetivos específicos

- Analisar as características dos parâmetros de qualidade de água dos reservatórios e trechos de rio localizados ao longo do Eixo Leste do PISF;
- Determinar as categorias de qualidade da água e de estado trófico dos corpos hídricos estudados;
- Verificar os parâmetros que mais influenciam na qualidade da água e na formação de grupos de reservatórios de acordo com sua similaridade;
- Analisar a gestão ambiental e de recursos hídricos aplicada ao Eixo Leste na forma de licenças ambientais, outorgas de uso da água e sistemas atuais de abastecimento.
- Propor recomendações para gestão dos possíveis impactos a fim de garantir o uso sustentável da água na área de estudo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este tópico apresenta um levantamento teórico sobre os temas relacionados a esta pesquisa, obtido por meio de estudo bibliográfico e documental. Inicia-se com uma abordagem sobre a gestão dos recursos hídricos, seguida de aspectos sobre experiências internacionais e nacionais em projetos de integração entre bacias hidrográficas, para então dar enfoque ao caso do Projeto de Integração do Rio São Francisco. Finaliza com a exploração da temática da avaliação da qualidade da água em pontos relevantes para o entendimento deste estudo.

2.1 GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS

A água é um bem de fundamental importância para a vida no planeta, e a manutenção do equilíbrio nas relações entre os seres vivos e o ambiente. Assim, enquanto recurso natural, é necessário que seja utilizada de forma compatível com sua importância, a fim de se estabelecer um equilíbrio entre a disponibilidade e a demanda, promovendo a diminuição dos conflitos pelo seu uso (CAPELLARI; CAPELLARI, 2018).

As diversas regiões do mundo possuem disponibilidades hídricas diferentes, e mesmo em lugares que possuem maiores ofertas, a crescente pressão sobre os mananciais e os problemas de gestão são os principais fatores que motivam a busca de novas fontes (ANA, 2017a). Especialmente nos grandes centros urbanos, a forma como os recursos hídricos são utilizados e a sua consequente degradação vem provocando crises de grandes proporções, que tendem a se intensificar devido às mudanças que vêm ocorrendo nos padrões climáticos globais (GOMES; BARBIERI, 2004).

As projeções do clima trazem perspectivas alarmantes para as próximas décadas, como o derretimento das geleiras ameaçando o suprimento de água de milhões de pessoas, populações mais expostas a enchentes nas regiões costeiras, períodos maiores de seca em regiões como a Europa, a Amazônia e o Nordeste brasileiro, além de mais um sem número de catástrofes que afetarão pessoas ao redor do mundo (MARENGO, 2008). Assim, com a disponibilidade de água dependendo em grande parte do clima, tornou-se um grande desafio compatibilizar crescimento e desenvolvimento com as possibilidades de suprimento hídrico.

Para enfrentamento do problema, é necessária a elaboração de métodos de planejamento, coordenação e fiscalização para os usos da água, que sejam direcionados à otimização deste recurso. Isso remonta à concepção de gestão de recursos hídricos, tendo

como objetivo preservar e recuperar a quantidade e a qualidade das águas, garantindo a segurança hídrica das futuras gerações (ANA, 2017a).

A temática ambiental, e, por consequência, a dos recursos hídricos, vindo sendo discutida fortemente pela comunidade internacional nas últimas décadas. Um marco histórico bastante importante aconteceu em 2015, desenvolvido pela Organização das Nações Unidas - ONU, denominado Agenda 2030. A nova Agenda fundamenta-se na Declaração Universal e tratados internacionais dos Direitos Humanos, a Declaração do Milênio e os resultados da Cúpula Mundial de 2005. Nela foram firmados 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) (Figura 1 e Quadro 1) e 169 metas, acordados pelos países-membros da ONU, como forma de contribuir para o desenvolvimento sustentável e chegar a um acordo global sobre a mudança climática com horizonte de alcance até 2030 (ONU, 2015).

Figura 1 - Objetivos do Desenvolvimento Sustentável estabelecidos na Agenda 2030



Fonte: ONU (2015).

Quadro 1 - Descrição dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável

Objetivo	Descrição
1	Acabar com a pobreza em todas as suas formas, em todos os lugares
2	Acabar com a fome, alcançar a segurança alimentar e melhoria da nutrição e promover a agricultura sustentável
3	Assegurar uma vida saudável e promover o bem-estar para todos, em todas as idades
4	Assegurar a educação inclusiva e equitativa e de qualidade, e promover oportunidades de aprendizagem ao longo da vida para todos
5	Alcançar a igualdade de gênero e empoderar todas as mulheres e meninas
6	Assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todos
7	Assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todos
8	Promover o crescimento econômico sustentado, inclusivo e sustentável, emprego pleno e produtivo e trabalho decente para todos
9	Construir infraestruturas resilientes, promover a industrialização inclusiva e sustentável e fomentar a inovação
10	Reduzir a desigualdade dentro dos países e entre eles
11	Tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis

Objetivo	Descrição
12	Assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis
13	Tomar medidas urgentes para combater a mudança do clima e seus impactos
14	Conservação e uso sustentável dos oceanos, dos mares e dos recursos marinhos para o desenvolvimento sustentável
15	Proteger, recuperar e promover o uso sustentável dos ecossistemas terrestres, gerir de forma sustentável as florestas, combater a desertificação, deter e reverter a degradação da terra e deter a perda de biodiversidade
16	Promover sociedades pacíficas e inclusivas para o desenvolvimento sustentável, proporcionar o acesso à justiça para todos e construir instituições eficazes, responsáveis e inclusivas em todos os níveis
17	Fortalecer os meios de implementação e revitalizar a parceria global para o desenvolvimento sustentável

Fonte: ONU (2015).

Nesse contexto, a gestão de recursos hídricos está relacionada ao ODS 6 – Água potável e saneamento, que estabelece que até 2030 deve-se assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todos, listando as seguintes metas para o cumprimento desse objetivo:

- 6.1 Até 2030, alcançar o acesso universal e equitativo a 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).

Segundo Milan (2017), o ODS 6 interage com vários dos outros ODS propostos particularmente em contextos urbanos, apontando que a magnitude do aumento do uso doméstico da água afetará as demandas industriais e agrícolas. Além disso, o desempenho atual das metas 6.1 e 6.2 indica que os países com os maiores desafios à frente também possuem recursos financeiros limitados que entram em competição com outras demandas alvo dos ODS.

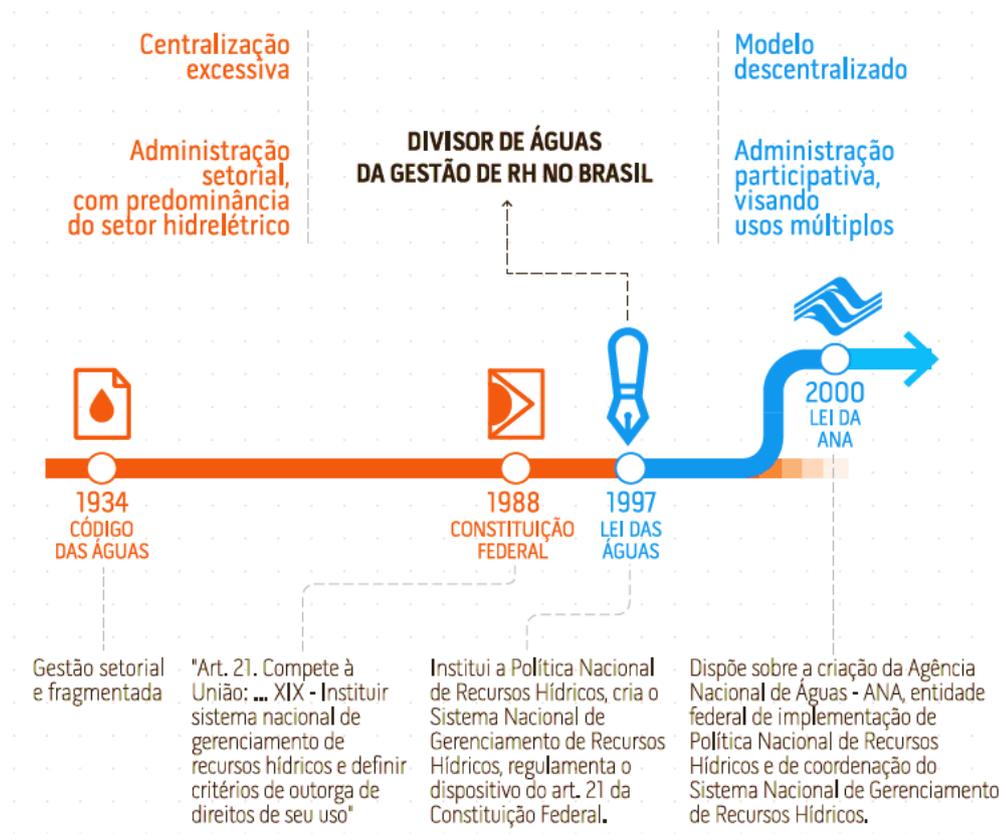
Assim como vários dos ODS têm conceitos relacionados, a gestão dos recursos hídricos está associada a várias áreas do conhecimento como clima, energia, uso e ocupação do solo, além de políticas públicas. Dessa forma, é necessária uma gestão que considere todos esses fatores como importantes para a garantia da oferta de água no presente e futuro e na busca da sustentabilidade no uso dos recursos hídricos.

2.1.1 Gestão de Recursos Hídricos no Brasil

O Brasil, na posição de um dos países que possuem a maior disponibilidade de água doce do mundo, sofre de uma ilusória sensação de comodidade diante do cenário de escassez, pois os recursos hídricos estão distribuídos de forma heterogênea tanto espacial quanto temporalmente. Esses aspectos, somados aos diversos usos dos recursos hídricos nas bacias hidrográficas brasileiras e os crescentes problemas de qualidade de água, geram áreas de conflito que demandam uma resposta (ANA, 2019).

No decorrer da história recente foram elaboradas legislações para tratar da propriedade e dos usos da água no Brasil, sendo a pioneira chamada de Código das Águas, um decreto federal promulgado em 1934 em um contexto nacional no qual a água era tida como um bem em abundância (ANA, 2017a). Com o desenvolvimento do país e o agravamento da escassez em algumas regiões, a gestão da água evoluiu na direção do modelo aplicado hoje (Figura 2).

Figura 2 - Principais fatos históricos da gestão de recursos hídricos no Brasil



Fonte: ANA (2017a).

A atual gestão dos recursos hídricos no Brasil tem como base a Lei nº 9.433/1997, conhecida como “Lei das Águas”, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH). Os fundamentos que conferem à água o caráter de bem de domínio público, recurso natural limitado dotado de valor econômico e a gestão descentralizada foram estabelecidos já no artigo 1º da nova lei, demonstrando uma mudança de paradigma.

A PNRH definiu a bacia hidrográfica como unidade territorial de planejamento e gestão, dessa forma, o gerenciamento da água não considera os limites administrativos e políticos dos órgãos federados. A lei também estabelece cinco instrumentos, importantes para organizar a PNRH por meio de ações de planejamento, regulação, fiscalização e divulgação de informações (ANA, 2017a). 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; cobrança pelo uso de recursos hídricos; e o Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos (BRASIL, 1997).

Os Planos de Recursos Hídricos (PRH) são ferramentas de gestão que incluem tanto o diagnóstico detalhado da quantidade, qualidade e gestão dos recursos hídricos em seu território de abrangência, quanto a previsão a partir de simulações da situação hídrica

considerando diferentes cenários socioeconômicos, climáticos ou de outra natureza, podendo ser elaborados para o país, para um estado ou o Distrito Federal, ou para bacias hidrográficas específicas. São concebidos de forma participativa, envolvendo governo, sociedade civil, usuários e diferentes instituições com a intenção de estabelecer um pacto pelo uso da água. (ANA, 2017a).

O enquadramento dos corpos hídricos em classes segundo os principais usos da água tem como objetivo indicar a meta de qualidade das águas em função dos tipos de uso, tendo como parâmetro a Resolução nº 357 de 2005 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). O instrumento busca garantir às águas uma qualidade em harmonia com os usos mais exigentes a que forem designadas, ao mesmo tempo minimizando gastos com o combate à poluição (MACHADO; KNAPIK; BITENCOURT, 2019).

A outorga tem como objetivo possibilitar o controle quantitativo e qualitativo para os diversos usos da água, seja para abastecimento público, fins industriais, irrigação ou lançamento de efluentes. Trata-se do direito concedido de acesso à água para o seu uso, e sua implementação demanda dados relativos à disponibilidade em quantidade e qualidade, além dos usuários a montante e jusante do ponto de autorização da outorga (BRAGA et al., 2008).

A cobrança pelo uso dos recursos hídricos é o instrumento que visa reconhecer a água como bem de valor econômico e dar aos usuários uma indicação de seu real valor, estimulando a racionalização e controle do seu uso e arrecadando recursos financeiros com a finalidade de subsidiar os programas e intervenções contemplados nos planos de recursos hídricos para melhorias ambientais na bacia em que foram gerados (ANA, 2018).

Por fim, o Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) é composto por um grande banco de dados e informações sobre a situação quanti-qualitativa das águas do país, tendo como objetivo a coleta, organização e transmissão desses elementos. Com o levantamento das informações disponibilizadas pelo SNIRH, os Planos de Recursos Hídricos podem ser construídos com maior detalhamento e exatidão (ANA, 2019).

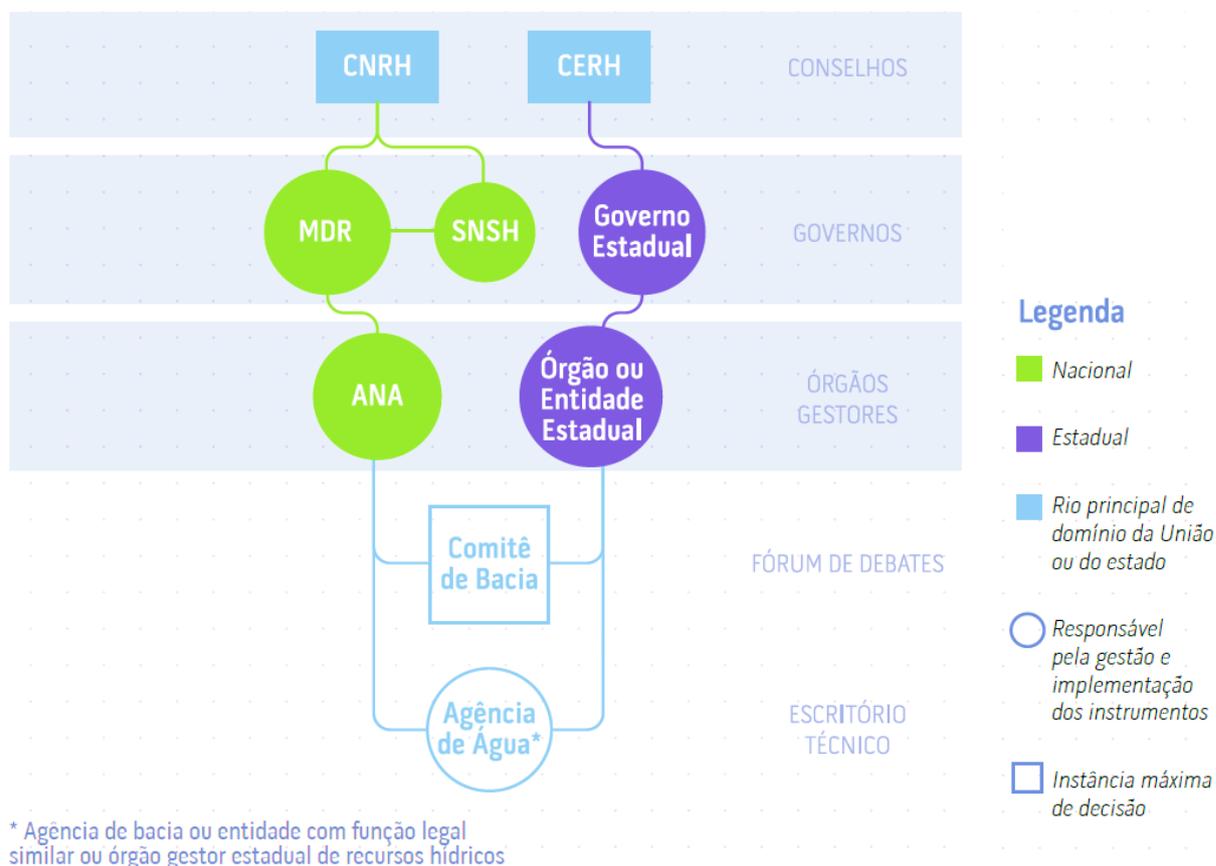
Com a implementação dos instrumentos, a PNRH constitui uma gestão descentralizada e com a participação dos diversos atores da sociedade. Os instrumentos se relacionam entre si e são importantes para garantir que a gestão de recursos hídricos no Brasil alcance a proteção das águas para as presentes e futuras gerações, além da possibilidade de resolução dos conflitos pelo seu uso.

Para que a PNRH se aproxime de seus objetivos, é necessário que cada ente federativo saiba seu limite de intervenção, de acordo com o domínio dos corpos d'água, para que haja integração no processo de gestão. Assim, a Lei 9.433/1997 estabelece no seu Art. 29 as

competências dos poderes executivos federal, estaduais e municipais, balizando o poder público no desenvolver de suas ações.

A Lei da Águas também cria o Sistema Nacional de Gerenciamento dos Recursos Hídricos (SINGREH), concebido para implementar a PNRH por meio de suas instituições integrantes. O SINGREH é composto por entidades com funções distintas, que podem ser deliberativas (Conselhos de Recursos Hídricos e Comitês de Bacias) ou operacionais (Órgãos Gestores e Agências de Água) (Figura 3). Devido à mudança na estrutura administrativa do governo federal, em 2019 o Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) passou a ser vinculado à Secretaria Nacional de Segurança Hídrica (SNSH) do Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR), e também a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) se tornou integrante do dito Ministério (ANA, 2019).

Figura 3 - Matriz institucional dos integrantes do SINGREH em 2019



Fonte: ANA (2019).

2.2 PROJETOS DE TRANSFERÊNCIA DE ÁGUA ENTRE BACIAS HIDROGRÁFICAS

O desenvolvimento da sociedade gera um conseqüente aumento da demanda de água para as atividades domésticas e econômicas, afetando ainda mais as áreas que já estão sujeitas

à carência de água seja por características naturais ou por efeito da ação humana. Alternativas para contornar esse problema surgiram ao longo do tempo, como o armazenamento da água recolhida durante a estação chuvosa para uso na estação seca e o reuso de águas residuárias, são importantes e possuem vantagens e desvantagens. Uma das alternativas que causa mais controvérsia é a transferência de água entre bacias hidrográficas.

Uma transferência de água entre bacias significa a construção de projetos que abrangem duas ou mais bacias hidrográficas para transferir água de uma região com recursos hídricos abundantes para outra em que o bem é escasso, realizando assim o ajuste da quantidade de água entre as bacias e resolvendo a demanda de água na área deficiente (ZHUANG, 2016). A operação desses projetos parece resolver o problema do desequilíbrio entre demanda e oferta da água, porém, produz uma série de efeitos no meio em que são introduzidas.

Gupta e van der Zaag (2008) ressaltam que esses projetos tendem a despertar muitas perguntas de diferentes grupos de interesse e comunidades envolvidas e afetadas. Tais questões estão relacionadas a diferentes disciplinas e tradições acadêmicas, incluindo viabilidade técnica, desafios tecnológicos e a necessidade de especialistas para projetá-los e operá-los (engenharia), impactos ambientais (ecologia), a proteção de direitos e garantias das comunidades locais, os impactos na cultura e meios de subsistência (antropologia e sociologia), como os benefícios e custos são distribuídos (economia) e questões relacionadas à participação pública, boa governança e um processo político mais amplo (administração pública e ciências políticas).

À medida que os problemas ecológicos e ambientais se tornam mais relevantes a cada dia, a sociedade concentra maior atenção nos impactos ecológicos e ambientais dos projetos dessa natureza, e seus efeitos na comunidade. Desse ponto de vista, um resumo dos principais impactos das transferências de água entre bacias nas bacias doadoras e receptoras é apresentado no Quadro 2.

Quadro 2 - Impactos ambientais e socioeconômicos observados em transferências de água entre bacias

Impactos ambientais e socioeconômicos	Bacia doadora	Bacia receptora
Negativos	Comprometimento de projetos existentes e futuros que demandem disponibilidade hídrica; Possibilidade de perdas de oferta e qualidade nos serviços básicos (água, energia, saúde, educação etc.);	Perdas de água por lixiviação, evaporação, contaminação etc.; Aporte de elevados níveis de nutrientes;

	Alterações hidrológicas; Alteração da disponibilidade hídrica; Comprometimento da qualidade da água devido à redução da capacidade de diluição; Intrusão salina no estuário.	Erosão nos rios receptores; Alterações ecológicas devido à importação de fauna e flora; Propagação de poluição e doenças; Desperdício dos recursos hídricos.
Positivos	Possibilidade de controle de inundações.	Alívio da subsidência do solo causada pela superexploração das águas subterrâneas; Melhoria da qualidade da água; Sustentabilidade nas atividades agrícolas e hidrelétricas; Melhoria dos serviços ambientais (vazão ecológica, drenagem etc.); Abastecimento urbano e industrial.

Fonte: Adaptado de Azevedo et al. (2005) e Zhuang (2016).

Zhuang (2016) também aponta os impactos causados ao longo da rota de transferência das águas, listando como positivos o desenvolvimento da pesca, irrigação, turismo, habitat para a vida selvagem em extinção; e como negativos a possível salinização em ambos os lados dos canais de transporte quando usados inadequadamente para irrigação, além dos efeitos do canal aberto nas rotas de migração e mortalidade animal.

Diante de tantas consequências, antes da decisão de implementar esse tipo de empreendimento devem ser considerados completamente os impactos que podem ser produzidos na sociedade, economia e meio ambiente, condicionando a elaboração de modo a se obter o máximo de benefícios globais (AZEVEDO et al., 2005).

2.2.1 Experiências internacionais

As transferências de água entre bacias se desenvolveram ao longo da história por todo o mundo e são responsáveis por significativas retiradas de água, que tendem a crescer com o aumento da demanda. Segundo Gupta e van der Zaag (2008), espera-se que a retirada global de água por meio dos esquemas de transferência entre bacias aumente em 25% até 2025, principalmente por meio da expansão dos projetos de transferência de água.

Existem diversas versões desses esquemas de transferência mundo a fora, de pequena escala até megaprojetos em desertos e terras áridas, com propósitos de dispor água para usos como irrigação, abastecimento humano, produção de energia, navegação e desenvolvimento industrial (STERNBERG, 2016).

Em seu estudo sobre megaprojetos de transferência de água como uma potencial solução para relação água-comida-energia (water-food-energy nexus), Shumilova et al. (2018)

compilou informações sobre megaprojetos de transferência de água, sejam propostos, planejados ou em construção, chegando à conclusão que mais da metade se localiza na América do Norte e Ásia. A seguir, são brevemente apresentadas cinco entre as mais relevantes experiências internacionais.

Assim como muitas regiões do mundo, a China sente os efeitos da distribuição desigual da água em seu território, com o norte do país sofrendo de uma escassez cada vez mais intensa devido à grande industrialização e crescimento populacional, e o sul padecendo com inundações frequentes (HE; HIPEL; KILGOUR, 2014; ZHUANG, 2016; ZHAO; ZUA; ZILLANTE, 2017). Nesse contexto, está em construção o “South-North Water Diversion Project (SNWDP)”, um megaprojeto que entregará águas da bacia do rio Yangtze para a planície norte da China. O esquema inclui três rotas principais de transferência de água: leste, central e oeste, além de conectar quatro grandes rios - Yangtze, Huai, Amarelo e Hai (PRC, 2016). Sua execução teve início em 2002 e a conclusão está estimada para 2050, com volume previsto de água a ser deslocada de 44,8 bilhões de m³ por ano, o que beneficiará mais de 300 milhões de pessoas entre demandas urbanas, industriais e agrícolas (ZHUANG, 2016; ZHAO; ZUA; ZILLANTE, 2017).

A região oeste dos Estados Unidos possui histórico de grandes projetos, em grande parte de usos múltiplos, especialmente contribuindo para a irrigação artificial. O “Colorado-Big Thompson Project” é um dos maiores e mais complexos realizados no país, desviando cerca de 320 milhões de metros cúbicos de água por ano do rio Colorado para o rio Big Thompson. A construção foi iniciada na represa Green Mountain em novembro de 1938 e concluída em 1959 com a finalização da Usina Big Thompson. Embora concebido para fins de irrigação agrícola, atualmente o projeto satisfaz demandas como abastecimento municipal e industrial, geração de energia elétrica e recreação (US BUREAU OF RECLAMATION, 2019).

O projeto “Snowy Mountains Hydroelectric Scheme (SMHS)” foi desenvolvido na Austrália com o intuito transferir águas da bacia do rio Snowy para a bacia do rio Murray e dispõe de infraestrutura que inclui 16 reservatórios, sete usinas hidrelétricas, uma estação de bombeamento, 145 km de túneis e 80 km de aquedutos. Sua construção ocorreu entre 1949 e 1974, e possui capacidade para transportar 1,13 bilhão de m³ de água por ano, que é usada para geração de energia, irrigação e também para apoiar o abastecimento de água do sudeste do país (WWF, 2007; ANDRADE et al., 2011; ZHUANG, 2016).

O “Karakum Canal” foi construído em um projeto concebido pela União Soviética, com o objetivo de desviar os canais naturais dos rios Amu Darya e Syr Darya para o leste do

Turcomenistão. A construção foi iniciada em 1954 e concluída na década de 80, possuindo 1400 km de extensão com trecho navegável de 450 km. A água levada pelo canal é utilizada principalmente para irrigação, o que gerou um aumento substancial dos benefícios econômicos na área receptora, porém, ao mesmo tempo, causou a crise do Mar de Aral, que é considerada uma das maiores catástrofes de origem humana no mundo. As principais fontes de água do Mar de Aral eram os rios Amu Darya e Syr Darya, e com a implantação do projeto, o volume de água direcionado para o Mar de Aral diminuiu drasticamente (KRIVONOGOV et al., 2014; ZHUANG, 2016).

No continente africano, o “Lesotho Highlands Water Project (LHWP)” transfere aproximadamente 950 milhões de m³ de água por ano do rio Senqu no Lesoto para o rio Orange, fornecendo água à região de Gauteng, na África do Sul, e gerando hidroeletricidade para o Lesoto. A África do Sul ajudou Lesoto na construção da infraestrutura necessária para o projeto, e ainda paga *royalties* correspondentes a uma porcentagem da economia de custos em comparação com a próxima melhor alternativa para o suprimento de água que a região necessita. O projeto é multifásico, e a Fase I foi concluída em 2003 e inaugurada em 2004, enquanto a Fase II ainda está em andamento (GUPTA; VAN DER ZAAG, 2008; LHWC, 2019).

2.2.2 Experiências nacionais

A experiência do Brasil em transferências de água entre bacias hidrográficas se deu, em geral, com empreendimentos de menor escala. Esse fato se deve, principalmente, ao país possuir uma grande disponibilidade de água doce, tanto superficial quanto subterrânea, mesmo que irregularmente distribuída. Essa disparidade é evidente na abundância de chuvas na Amazônia, sazonalidade bem marcada no Centro-Oeste, baixa disponibilidade e escassez no Semiárido e chuvas regulares nas regiões Sul e Sudeste (ANA, 2017a). Assim, os principais casos de transferência entre bacias brasileiras têm o objetivo de levar água para algumas capitais de estados com maior demanda, bem como para a geração de energia. A seguir, são resumidamente retratadas quatro das mais importantes experiências nacionais.

No caso do sistema Alto Tietê-Baixada Santista, a finalidade foi aumentar a capacidade de geração de energia elétrica da Usina Hidrelétrica de Henry Borden, localizada em Cubatão (SP). O esquema conta com barragens e usinas elevatórias para levar as águas até o reservatório Billings, seguindo então pelo reservatório de Pedras, transpondo a bacia do

Alto Tietê para a bacia do rio Cubatão, na Baixada Santista, permitindo sua industrialização e urbanização (AZEVEDO et al., 2005).

O projeto denominado Sistema Cantareira, localizado na região sudeste, foi concluído em 1973, e atua no abastecimento de água de 8,8 milhões de habitantes na Região Metropolitana de São Paulo. O sistema, que é operado pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP), é composto por seis reservatórios (Jaguari, Jacareí, Cachoeira, Atibainha, Paiva Castro e Águas Claras), os quais estão conectados por túneis subterrâneos e canais e formam o Sistema Equivalente do Cantareira, onde são bombeadas águas da bacia do rio Piracicaba para a bacia do rio Alto Tietê (ANDRADE et al., 2011; SABESP, 2019).

A transferência das águas do rio Paraíba do Sul para a bacia do rio Guandu se dá por meio do Sistema Guandu, que foi implantado pela empresa Ligth Serviços de Eletricidade e iniciou sua operação em 1952 com finalidade de geração de energia para Região Metropolitana do Rio de Janeiro. Atualmente, o projeto também atende às demandas de abastecimento doméstico, industrial e rural da região. A quantidade de água retirada do rio Paraíba do Sul, corresponde a cerca de 2/3 da sua vazão regularizada (ANDRADE et al., 2011; DEMANBORO, 2015).

O Canal da Redenção foi construído, na Paraíba, para conduzir água proveniente do sistema Coremas/Mãe d'água em direção ao Perímetro Irrigado Várzeas de Sousa, localizado entre os municípios de Sousa e Aparecida. A iniciativa foi realizada através de parceria entre o Governo do Estado da Paraíba e o Governo Federal, com o objetivo de alavancar e dinamizar a agricultura na sua área de influência, através de práticas voltadas para o desenvolvimento agrícola e agroindustrial (MORAIS et al., 2018).

Das experiências nacionais com transferências de água, o PISF é a maior e mais importante obra de infraestrutura hídrica, e, como objeto de estudo deste trabalho, será discutido com maiores detalhes nas próximas sessões.

2.3 O PROJETO DE INTEGRAÇÃO DO RIO SÃO FRANCISCO COM BACIAS DO NORDESTE SETENTRIONAL (PISF)

O Nordeste brasileiro é uma região que sofre com reduzida disponibilidade hídrica, devido aos mais baixos índices de precipitação no país e irregularidade do seu regime, altas temperaturas praticamente durante todo o ano, restrita capacidade de armazenamento de água no solo, além de outros fatores. Isso ocorre, sobretudo, na região Semiárida, onde se situa o

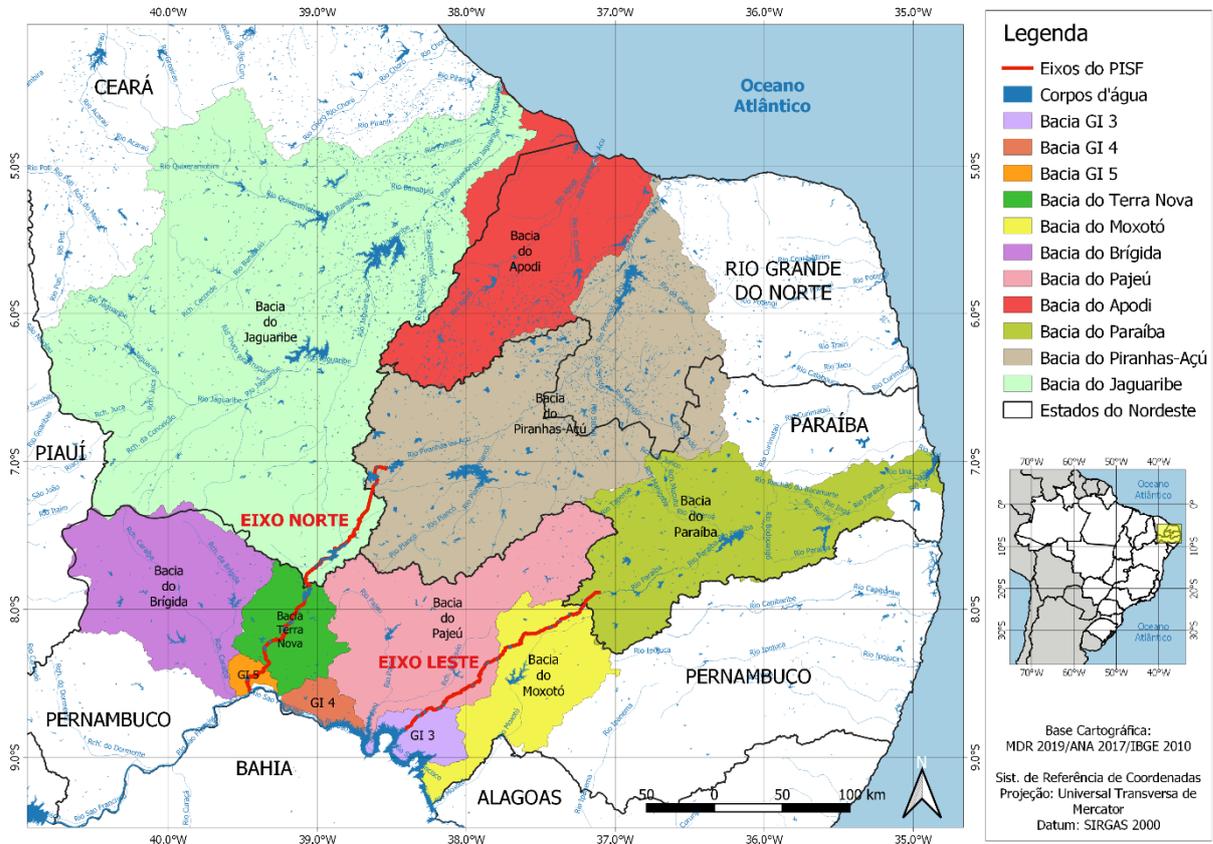
Nordeste Setentrional, formado pelos estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba e Pernambuco (ANA, 2019).

Dentre as alternativas para ampliar a oferta de água e garantir a segurança hídrica dos usuários do Semiárido, foi idealizado o Projeto de Integração do Rio São Francisco com Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional (PISF). Ao longo da história, os primeiros esboços e debates sobre um projeto que levaria águas do São Francisco para regiões que sofrem com a seca no Nordeste datam do século XIX, após a independência do Brasil (MI, 2004). Anos mais tarde, após várias versões do projeto terem sido elaboradas e recusadas durante todo o século XX, em 26 de setembro de 2005, através da Resolução Federal nº 411, a ANA outorgou ao Ministério da Integração Nacional o direito de captar por 20 anos água do São Francisco para a transposição em outras bacias (BRASIL, 2005).

O então novo projeto prevê uma captação de água realizada de forma flexível quanto à disponibilidade de vazão do rio São Francisco, onde a retirada pode ser de 26,4 m³/s em períodos muito secos, chegando a 127 m³/s na temporada de cheia, de forma a não prejudicar o manancial (MDR, 2019a). Entretanto, a vazão média que é prevista para captação ao longo do período de operação do projeto é 63 m³/s, que corresponde a cerca de 3,5% da vazão disponível (MI, 2004).

Segundo o atual Ministério do Desenvolvimento Regional (2019b), o PISF visa garantir a segurança hídrica de 12 milhões de habitantes, em 390 municípios dos estados de Pernambuco, Ceará, Paraíba e Rio Grande do Norte, através de dois Eixos de transferência de água: o Norte e o Leste, com 260 km e 217 km de extensão, respectivamente, totalizando 477 km (Figura 4). Ao todo, os eixos são compostos por 9 estações de bombeamento, 27 reservatórios, 4 túneis, 13 aquedutos, 9 subestações de 230 kV, e 270 km de linhas de transmissão em alta tensão.

Figura 4 - Localização dos eixos do Projeto de Integração do Rio São Francisco



Fonte: A autora (2021).

O rio São Francisco nasce na Serra da Canastra, em Minas Gerais, e corre no sentido Sul-Norte, com sua foz, no Oceano Atlântico, localizada entre os estados de Alagoas e Sergipe, completando cerca de 2800 km de extensão. A sua bacia hidrográfica é dividida em quatro regiões fisiográficas (Alto, Médio, Submédio e Baixo), estendendo-se pelos estados de Minas Gerais, Bahia, Pernambuco, Sergipe, Alagoas, Goiás e o Distrito Federal, inseridos nas regiões Nordeste, Sudeste e Centro-Oeste do país (ANA, 2015). A captação dos dois eixos do PISF ocorre na região do Submédio São Francisco, no estado de Pernambuco.

O Eixo Norte tem início com a captação no rio São Francisco no município de Cabrobó (PE), percorrendo cerca de 260 km pelos estados de Pernambuco, Ceará e Paraíba, até concluir seu caminho no reservatório Engenheiro Ávidos, na bacia do rio Piranhas-Açu, no estado da Paraíba. Os reservatórios presentes no percurso são mostrados no Quadro 3. Os ramais associados ao PISF no Eixo Norte conduzirão a água às bacias dos rios Brígida e Terra Nova, em Pernambuco; Salgado e Jaguaribe, no Ceará; Apodi, no Rio Grande do Norte; e Piranhas-Açu, na Paraíba e Rio Grande do Norte (MDR, 2019b).

Quadro 3 - Reservatórios do Eixo Norte do PISF

Estado	Município	Reservatório
Pernambuco	Cabrobó	Tucutú
		Terra Nova
		Serra do Livramento
	Salgueiro	Mangueira
		Negreiros
	Verdejante	Milagres
Ceará	Jati	Jati
	Brejo Santo	Atalho (já existente)
		Porcos
		Cana Brava
		Cipó
		Boi I
		Boi II
Paraíba	São José de Piranhas	Morros
		Boa Vista
	Cajazeiras	Caicara
		Engenheiro Ávidos (já existente)

Fonte: MDR (2019b).

O Eixo Leste se desenvolve a partir da captação no reservatório de Itaparica, em Floresta (PE), percorrendo 217 km em direção ao estado da Paraíba, finalizando sua extensão ao alcançar o reservatório Poções, em Monteiro (PB), onde, a partir deste ponto, as águas do São Francisco seguem distribuídas no fluxo da bacia do rio Paraíba. Os reservatórios por onde correm as águas do Eixo Leste em Pernambuco e na Paraíba são apresentados no Quadro 4. O eixo também beneficiará a região do Agreste Pernambucano, através da implementação do Ramal do Agreste, que atravessa as bacias dos rios Moxotó e Ipojuca (MDR, 2019b).

Quadro 4 - Reservatórios do Eixo Leste do PISF

Estado	Município	Reservatório
Pernambuco	Floresta	Areias
		Braúnas
		Mandantes
		Salgueiro
		Muquém
	Custódia	Cacimba Nova
		Bagres

	Sertânia	Copiti
		Moxotó
		Barreiro
		Campos
		Barro Branco
Paraíba	Monteiro	Poções (já existente)
	Camalaú	Camalaú (já existente)
	Boqueirão	Epitácio Pessoa (já existente)
	Itatuba	Acauã (já existente)

Fonte: MDR (2019b).

O Eixo Leste encontra-se em pré-operação desde março de 2017, contribuindo para o abastecimento da região que é suprida pelo Epitácio Pessoa, a qual vinha sendo grandemente impactada pelos baixos níveis que esse importante reservatório atingiu nas últimas décadas (SILVA; RIBEIRO; MIRANDA, 2017). No Eixo Norte, as obras do trecho que compreende os reservatórios canais até Jati (CE) foram inauguradas em junho de 2020, levando as águas do São Francisco para o estado do Ceará.

2.4 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA

A qualidade da água é afetada tanto por variáveis naturais, por exemplo, relacionadas ao regime de precipitação, escoamento superficial na bacia hidrográfica, geologia, matas ciliares e cobertura vegetal do solo, quanto por influências antrópicas, como o lançamento de efluentes domésticos ou industriais provenientes de fontes pontuais e fontes difusas, o manejo inadequado dos solos para a agricultura, entre outros (SILVA et al., 2008; MARMONTEL; RODRIGUES, 2015; ANA, 2019). A maior parte desses fatores tem relação com o uso do solo nas proximidades dos corpos hídricos, afetando direta e indiretamente suas propriedades.

O uso e cobertura do solo são elementos chave da paisagem, afetando a qualidade da água mediante seu impacto na poluição lançada de forma difusa, resultante do escoamento superficial afetado pelas interações do cenário (BROGNA et al., 2018). Melhorar a compreensão dessas relações pode ajudar a gerenciar a qualidade da água em bacias hidrográficas, e fornece recomendações aos gestores e formuladores de políticas no processo de decisão de planejamento territorial (GIRI; QIU, 2016).

Água limpa e potável não é apenas essencial para a saúde humana. A boa qualidade da água é importante para evitar o fenômeno da eutrofização, bem como para manter saudáveis os ecossistemas ribeirinhos, marinhos e costeiros, o que faz parte das metas do ODS 6, que

aborda o tema Água potável e Saneamento, já mencionado anteriormente (MALLYA; HANTUSH; GOVINDARAJU, 2018).

A eutrofização é o enriquecimento das águas com os nutrientes necessários ao crescimento da vida vegetal aquática. Esse fenômeno ocorre de forma natural com a evolução de um ecossistema aquático ao longo do tempo geológico, mas pode ser acelerado devido a ações antrópicas, sendo denominado eutrofização cultural. Nesse caso, trata-se de uma consequência da poluição das águas, desencadeando uma elevada quantidade de nutrientes (principalmente fósforo e nitrogênio) dissolvidos na água, provenientes principalmente do despejo de esgoto doméstico e industrial sem tratamento, além de fertilizantes agrícolas transportados da bacia hidrográfica pelo escoamento superficial (BRAGA et al., 2005; TUNDISI.; TUNDISI, 2008).

O acúmulo de substâncias tóxicas e de metais pesados, bem como outros resultados das atividades humanas nas bacias hidrográficas resulta em sérios problemas ecológicos, além de ter impacto na visão estética e na economia. Assim, os elementos adicionados à água de rios, lagos e represas, tornam a recuperação dos ecossistemas eutrofizados extremamente complexa e de alto custo (BHAGOWATI; AHAMAD, 2019).

Os reflexos da eutrofização dependem de fatores ambientais além do aporte de nutrientes: estado trófico inicial, profundidade média e morfometria, bem como o tempo de residência da água afetam a taxa e o tempo de progressão do evento (TUNDISI; TUNDISI, 2008). Dessa forma, segundo Le Moal et al. (2019), o mecanismo de resposta geral ao incremento nos insumos de nutrientes é a proliferações de grandes biomassas de espécies vegetais oportunistas adaptadas às novas condições ambientais, que substituem as espécies inicialmente presentes, induzindo a mudanças na estrutura e funcionamento de todas as comunidades (fitoplâncton, zooplâncton, fauna bentônica, peixes, etc.). Ainda, a degradação por bactérias resulta na depleção de oxigênio no meio aquático (hipóxia ou anoxia), ou mesmo em emissões tóxicas (CO_2 , H_2S e CH_4).

Variáveis que se relacionam com a eutrofização são utilizadas para caracterizar e quantificar o fenômeno, resultando em uma classificação trófica, ou graus de trofia. Geralmente são utilizadas a clorofila-a (adotada como medida indireta da biomassa algal), as espécies de algas presentes, a transparência das águas, além das concentrações de nutrientes e oxigênio dissolvido (ADAMOVICH et al., 2019).

Uma das formas mais empregadas para avaliar o estado trófico de um corpo hídrico é o uso do Índice de Estado Trófico (IET), que emprega como indicadores a concentração de fósforo total e clorofila-a na coluna de água, podendo também utilizar a transparência medida

pelo disco de Secchi. O IET funciona como um registro das ações humanas nas bacias hidrográficas, permitindo a possibilidade do controle da eutrofização através do planejamento dos usos da água nessas bacias (MAIA; CARVALHO; CARVALHO, 2015).

Outra ferramenta comumente utilizada na avaliação das características dos corpos hídricos é o Índice de Qualidade da Água (IQA). Este índice considera variáveis que indicam o grau de contaminação devido aos materiais orgânicos, nutrientes e sólidos, que normalmente são indicadores de poluição (FIA et al., 2015), e prejudicam a utilização da água para abastecimento público.

Para que seja possível a avaliação do estado de poluição, degradação ou conservação de rios, lagos, represas, estuários, águas costeiras e áreas alagadas, é necessário o monitoramento das suas propriedades físicas, químicas e biológicas. O monitoramento da qualidade da água trata da coleta de informações regulares e a formação de um banco de dados fundamental para futuras ações, proporcionando o direcionamento dos recursos para áreas prioritárias no controle da poluição hídrica (TUNDISI; TUNDISI, 2008).

No caso de uma rede de monitoramento estruturada, frequentemente são medidos diversos parâmetros, em diferentes momentos e locais. Dessa forma, o monitoramento resulta em uma complexa matriz de dados a ser interpretada. A aplicação de técnicas de estatística multivariada, como Análise de Componentes Principais e Análise de Cluster (ou Análise de Agrupamentos), vêm sendo amplamente utilizadas nesse contexto, pois possibilitam um melhor entendimento da qualidade da água, permitindo a identificação de variações temporais, espaciais e de fatores antropogênicos (VEGA et al., 1998; PALMA et al., 2010; JARDIM et al., 2014; CALAZANS et al., 2018).

O monitoramento também viabiliza o planejamento e a efetividade de instrumentos de gestão, como o enquadramento de corpos hídricos em classes de qualidade segundo os usos preponderantes da água, previsto na PNRH. O enquadramento é um instrumento de planejamento, pois não se baseia somente no estado atual de qualidade do corpo d'água, mas estipula a meta de qualidade de água a ser mantida ou alcançada, de acordo com os usos pretendidos (ANA, 2020a).

As classes para o enquadramento dos corpos de água superficiais, segundo os seus usos preponderantes para águas doces, salobras e salinas, são estabelecidas pela Resolução CONAMA nº 357/2005. A classe especial é destinada aos usos que requerem a melhor qualidade da água, sendo a mais restritiva à ação humana, não permitindo o lançamento de efluentes mesmo quando tratados. Quanto maior o número da classe, menos exigente é o uso

da água, diminuindo-se a restrição às atividades que possam ser impactantes à sua qualidade. Assim, a classe 4 (para águas doces) e a classe 3 (para águas salinas e salobras) correspondem ao menor nível de qualidade de água para as classes de enquadramento. As classes de enquadramento para corpos de água doce, que geralmente são as mais utilizadas para abastecimento humano, são mostradas na Figura 5.

Figura 5 - Classes de enquadramento dos corpos de água doce segundo os seus usos

USOS DAS ÁGUAS DOCES	CLASSES DE ENQUADRAMENTO DOS CORPOS D'ÁGUA				
	Especial	1	2	3	4
 PRESERVAÇÃO DO EQUILÍBRIO NATURAL DAS COMUNIDADES AQUÁTICAS	Mandatório em UC de Proteção Integral				
 PROTEÇÃO DAS COMUNIDADES AQUÁTICAS		Mandatório em Terras Indígenas			
 RECREAÇÃO DE CONTATO PRIMÁRIO					
 AQUICULTURA					
 ABASTECIMENTO PARA CONSUMO HUMANO	Após desinfecção	Após tratamento simplificado	Após tratamento convencional	Após tratamento convencional ou avançado	
 RECREAÇÃO DE CONTATO SECUNDÁRIO					
 PESCA					
 IRRIGAÇÃO		Hortaliças cruas ou frutas com película	Hortaliças, frutíferas, parques, jardins e campos	Culturas arbóreas, cerealíferas ou forrageiras	
 DESSEDENTAÇÃO DE ANIMAIS					
 NAVEGAÇÃO					
 HARMONIA PAISAGÍSTICA					

Fonte: ANA (2017a).

Através das diversas variáveis físicas, químicas e biológicas de amostras colhidas nos corpos de água, além dos seus limites estabelecidos nas legislações, é que são calculados os índices que permitem avaliar se esse corpo hídrico tem condições de atender a determinado uso. Como indicadores de qualidade da água, cada variável possui um significado ambiental e sanitário, que são descritos brevemente no Quadro 5.

Quadro 5 - Significado ambiental das variáveis de qualidade da água

Variáveis	Conceito	Importância
Séries de Sólidos	Toda matéria que permanece como resíduo, após evaporação, secagem ou calcinação da amostra a uma temperatura pré-estabelecida durante um tempo fixado	Podem causar danos à vida aquática, retendo bactérias e resíduos orgânicos no fundo dos rios, promovendo a decomposição anaeróbia
Salinidade	É a soma dos sais dissolvidos na água	Variações na salinidade afetam as espécies dos ecossistemas aquáticos Um indicador da salinidade de uma água é a condutividade elétrica
Condutividade Elétrica	Expressão numérica da capacidade da água de conduzir corrente elétrica, indicando a quantidade de sais existentes na coluna d'água	Fornecer indicação das modificações na composição da água, especialmente na concentração mineral Aumenta quando mais sólidos dissolvidos são adicionados
Temperatura	Variações fazem parte do regime climático normal, bem como da estratificação vertical do corpo hídrico	Aumento é geralmente provocado por despejos industriais e de usinas termoeletricas e nucleares Atua na manutenção da vida aquática e no controle de processos biológicos de tratamento
Turbidez	É o grau de atenuação de intensidade que um feixe de luz sofre ao atravessar a água, devido à presença de sólidos em suspensão	Prejuízo estético na água de abastecimento Esgotos domésticos e efluentes industriais também provocam elevações na turbidez Reduz a penetração de luz na água prejudicando a fotossíntese
Alcalinidade Total	É uma medida da capacidade da água de neutralizar ácidos (capacidade de resistir às mudanças de pH), devido à presença de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos	Elevadas concentrações na água podem causar gosto amargo e incrustações em sistemas de abastecimento
Dureza Total	Definida pela presença de cálcio e magnésio, pode ser percebida pela capacidade da água de precipitar sabão	Causa sabor desagradável e efeito laxativo quando em altas concentrações Pode causar incrustações nas tubulações e reduzir a formação de espuma
pH	Representa a concentração de íons hidrogênio, dando uma indicação sobre a condição de acidez, neutralidade ou alcalinidade da água	Apresenta-se elevado em corpos de água eutrofizados Águas ácidas são potencialmente corrosivas e águas alcalinas são incrustantes
Oxigênio Dissolvido (OD)	Oxigênio proveniente da atmosfera dissolvido nas águas naturais, devido à diferença de pressão parcial	Indicador do nível de poluição dos corpos de água: geralmente, águas poluídas apresentam baixa concentração

Variáveis	Conceito	Importância
Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)	É a quantidade de oxigênio necessária para oxidar a matéria orgânica por decomposição microbiana aeróbia para uma forma inorgânica estável	Aumentos são provocados por despejos orgânicos, podendo induzir ao esgotamento de oxigênio na água causando a morte da vida aquática
Demanda Química de Oxigênio (DQO)	É a quantidade de oxigênio necessária para oxidação da matéria orgânica de uma amostra por meio de um agente químico, como o dicromato de potássio	Aumento da sua concentração num corpo d'água deve-se principalmente a despejos de origem industrial
Fósforo Total (PT)	Nutriente exigido em grande quantidade pelas células dos seres vivos, considerado como indicador da qualidade da água	Apontado como principal responsável pela eutrofização
		Quando está presente nas águas, encontra-se sob a forma de fosfato em diferentes formas, com nomenclatura que varia dependendo do autor
Ortofosfato (P-orto)	Também conhecido como Fósforo Reativo Solúvel ou Fósforo Inorgânico Dissolvido, é considerado a mais significativa das frações de fósforo por ser a principal forma de fosfato assimilada pelos vegetais aquáticos	Em lagos tropicais, devido à alta temperatura, o metabolismo dos organismos aumenta fazendo com que seja mais rapidamente incorporado, diminuindo sua concentração na água
Nitrogênio Total (NT)	Nutriente exigido em grande quantidade pelas células dos seres vivos, considerado como indicador da qualidade da água	Apontado como principal responsável pela eutrofização, importante para o crescimento de algas e macrófitas Pode ser encontrado nas águas nas formas de nitrogênio orgânico, amoniacal, nitrito e nitrato
Nitrogênio Amoniacal (NH ₄)	Forma reduzida do nitrogênio	Tóxico restritivo à vida de espécies de peixes que não resistem acima de 5mg/L Provoca consumo de OD das águas naturais ao ser oxidado biologicamente
Nitrito (NO ₂)	Forma intermediária do processo de oxidação do nitrogênio	E encontrado em baixas concentrações em ambientes oxigenados Em altas concentrações, é extremamente tóxico à maioria dos organismos aquáticos
Nitrato (NO ₃)	Forma oxidada do nitrogênio	São tóxicos, causando uma doença chamada metahemoglobinemia infantil, que é letal para crianças
Coliformes Termotolerantes	Micro-organismos do grupo coliforme capazes de fermentar a lactose a 44-45°C	Indicadores de contaminação fecal com possível presença de micro-organismos patogênicos
Clorofila-a	Um dos pigmentos responsáveis pelo processo fotossintético	Indicador da biomassa algal e do estado trófico em ambientes aquáticos
Feofitina-a	Produto da degradação da clorofila-a	Pode interferir na determinação da clorofila-a ao absorverem luz e fluorescerem na mesma região do espectro

Fonte: Tundisi e Tundisi (2008), Esteves (2011), CETESB (2019b).

2.4.1 Efeitos da transferência entre bacias na qualidade da água

A compreensão dos efeitos das transferências de água entre bacias nos ecossistemas envolvidos é essencial para uma gestão sustentável desses empreendimentos. Fatores como as diferenças físicas e biológicas entre os sistemas doador e receptor; a natureza da conexão entre eles (presença de dutos, canais, túneis etc.); e a magnitude, frequência e duração das transferências, foram os que mais repercutiram em decorrência de projetos avaliados por Soulsby, Gibbons e Robins (1999) e Gibbins, Jeffries e Soulsby (2000).

A maioria dos estudos dos impactos das transferências de água entre bacias está concentrada nos efeitos nas concentrações de nutrientes e variáveis biológicas como a clorofila-a e comunidade fitoplanctônica no sistema receptor, em esquemas que transportam grandes volumes a grandes distâncias (FORNARELLI; ANTENUCCI, 2011). Grandes projetos como o South-North Water Diversion Project (China) e o Shoalhaven System (Austrália) foram objetos de relevantes estudos dessa natureza, apresentados nos Quadros 6 e 7.

Quadro 6 - Exemplos de estudos dos impactos do South-North Water Diversion Project (SNWDP) na qualidade da água

Indicadores	Escopo do estudo	Resultados principais	Referência
Temp, OD, DBO, DQO, PT, NO ₃ e NH ₄	Investigar o impacto da Middle Route do SNWDP no rio Han e a eficácia dos 2 projetos de mitigação propostos.	A implementação da Middle Route trará níveis de poluição extremamente elevados e alto risco de proliferação de algas no curso médio e inferior do rio Han.	ZHU et al., 2008
Nitrogênio, Fósforo e Clorofila-a	Prever os impactos da transferência de água nas concentrações de nutrientes e o risco de eutrofização do sistema receptor.	Para minimizar o impacto da transferência de água nos nutrientes e Chl-a, a água deve ser transferida o mais uniforme possível com pequena descarga. A variação da Chl-a foi mais sensível a um aumento de P do que a um aumento de N para a água transferida.	ZENG; QIN; LI, 2015
21 variáveis incluindo algas, compostos de carbono, sílica, N, P, OD e Coli	Analisar os efeitos das transferências de água através de múltiplos cenários de riscos de eutrofização no reservatório Danjiangkou (doador).	A biomassa de algas na área onde o desvio de água é iniciado diminui visivelmente após o desvio.	CHEN; YANG; LIU, 2016

Fonte: A autora (2021).

Quadro 7 - Exemplos de estudos dos impactos do Shoalhaven System na qualidade da água

Indicadores	Escopo do estudo	Resultados principais	Referência
Compostos de P e N, sílica, ferro, manganês, algas e clorofila-a	Analisar como as transferências de água entre dois reservatórios afetaram a qualidade da água do reservatório receptor.	As altas vazões transferidas causaram aumento nas concentrações de sílica, ferro e clorofila-a, e nenhum crescimento de cianobactérias quando ocorreram no verão.	FORNARELLI; ANTENUCCI, 2011
PT, sílica, clorofila-a e biovolume do fitoplâncton	Analisar os efeitos da transferência de água entre dois reservatórios na comunidade fitoplanctônica a diversidade do reservatório receptor.	Altas vazões transferidas acarretaram diminuição na diversidade, dominância por espécies selecionadas e aumento do crescimento do fitoplâncton.	FORNARELLI; ANTENUCCI; MARTI, 2013
Temp, OD, pH, turb, nutrientes, clorofila-a, biovolume e gênero do fitoplâncton	Previsão e compreensão da dinâmica do fitoplâncton em um reservatório afetado por transferências de água através do uso de modelagem empírica.	As entradas e saídas de água nos reservatórios exercem controle sobre as diatomáceas e clorófitas, enquanto a Temp, N e P o biovolume das cianobactérias.	FORNARELLI et al., 2013

Fonte: A autora (2021).

Ainda na China, Hu et al. (2010) avaliaram as variações espaciais e temporais induzidas durante as duas transferências de água experimentais realizadas no Lago Taihu com o objetivo de melhorar a qualidade da água do lago. Os autores observaram que foi notável a redução de PT em determinadas regiões do lago, no entanto, a redução na concentração de NT e Chl-a foi relativamente fraca, indicando melhoria menos expressiva na qualidade da água em grandes lagos do que em pequenos. O estudo ainda afirma que a comparação entre a eficácia das transferências observada e estimada sugere uma superestimação da melhoria da qualidade da água no referido lago.

É importante considerar ainda os efeitos da seca na qualidade da água, já que normalmente as transferências entre bacias hidrográficas ocorrem para beneficiar regiões que sofrem com a estiagem frequente. Mosley (2015) afirma em seu estudo que as diminuições de vazão e volume durante a seca normalmente levam ao aumento da salinidade, e, em casos de ocorrência de fontes pontuais de poluição, a qualidade da água geralmente demonstrava deterioração, ambos devidos à menor diluição. Dessa forma, a qualidade da água já existente em um corpo hídrico que receberá o fluxo proveniente de fontes externas é um fator que influencia nos resultados da implantação desse tipo de sistema.

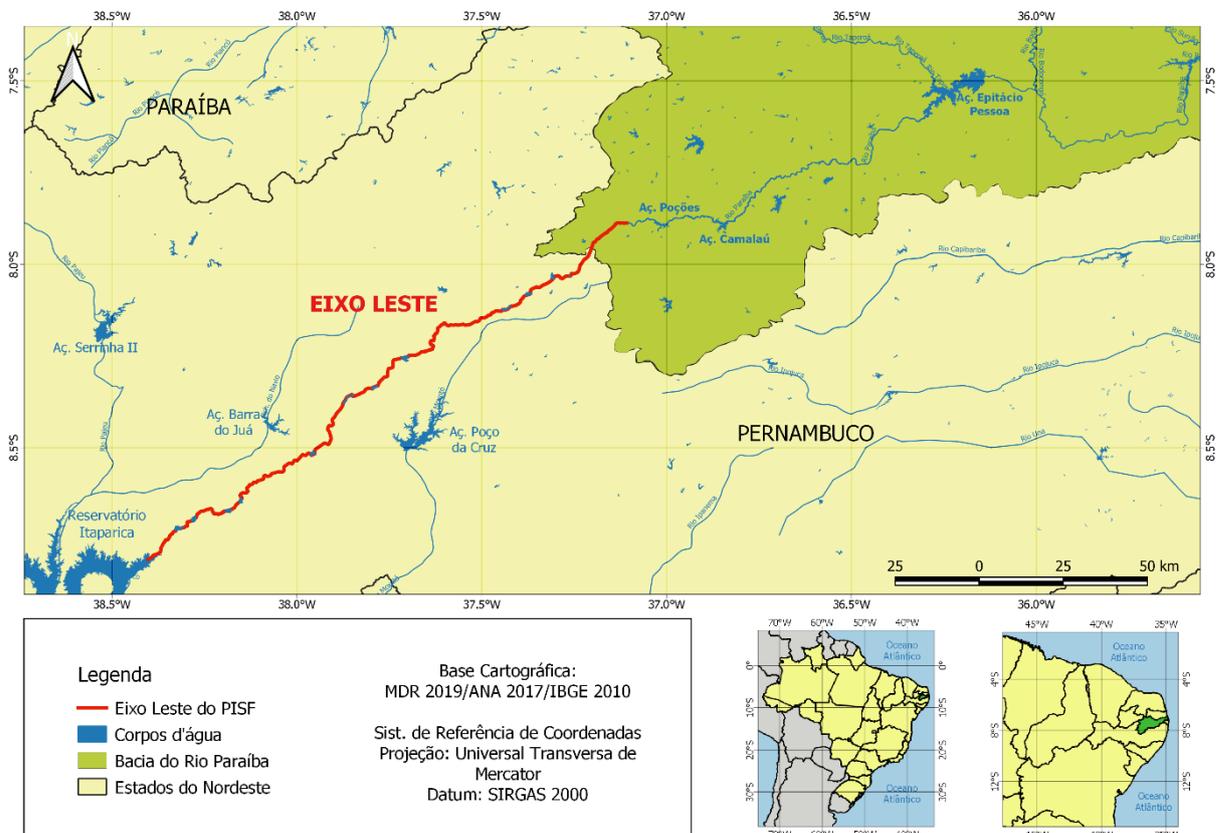
3 METODOLOGIA

Neste item é caracterizada a área de estudo, bem como descritos os procedimentos metodológicos utilizados para a obtenção dos resultados da pesquisa. Isso inclui o cálculo dos índices para avaliação da qualidade da água, a apresentação das técnicas estatísticas utilizadas e análise da gestão ambiental e de recursos hídricos no Eixo Leste.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo deste trabalho é composta pelos reservatórios projetados ao longo do Eixo Leste do PISF, além de reservatórios já existentes e trechos de rios na bacia do Paraíba, que é uma das bacias receptoras do projeto. Segundo o Ministério do Desenvolvimento Regional (2019a), o Eixo Leste (Figura 6) foi planejado com o objetivo de levar água para cerca de 4,5 milhões de pessoas em 168 municípios afetados pela seca nos estados de Pernambuco e na Paraíba.

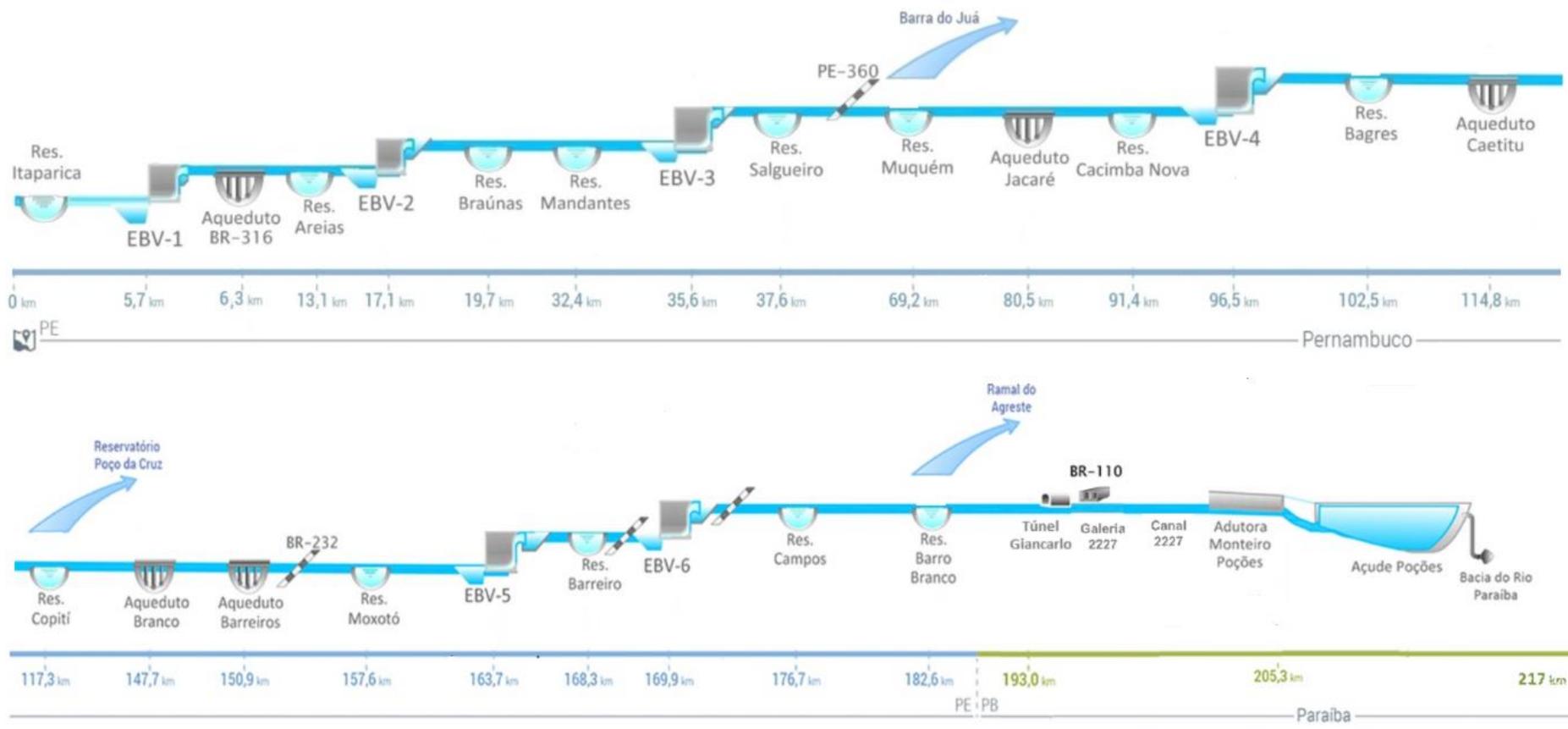
Figura 6 - Localização do Eixo Leste do PISF



Fonte: A autora (2021).

O trecho possui 217 km de extensão, e tem seu desenvolvimento a partir do canal de captação no reservatório Itaparica, localizado em Floresta (PE). Ao longo de seu curso, há seis estações de bombeamento (EBV-1, 2, 3, 4, 5 e 6), cinco aquedutos, um túnel, uma adutora e 12 reservatórios projetados de pequeno porte, até chegar ao Açude Poções, em Monteiro (PB), e seguir pela bacia do rio Paraíba. Das águas captadas, parte será conduzida para os açudes Barra do Juá (Floresta - PE) e Poço da Cruz (Ibimirim - PE), e parte para o reservatório Ipojuca (Arcoverde - PE), através do Ramal do Agreste. A Figura 7 mostra o diagrama esquemático do Eixo Leste do PISF.

Figura 7 - Diagrama esquemático do Eixo Leste do PISF



Fonte: adaptado de MDR (2019b).

Os reservatórios de pequeno porte ao longo do Eixo Leste são denominados de reservatórios de compensação. Sua construção se tornou necessária devido à interrupção do bombeamento nos horários de pico dos dias úteis, visto que o custo da energia elétrica se mostra maior nesses horários (TCU, 2013). São eles, em sequência: Areias, Braúnas, Mandantes, Salgueiro, Muquém, Cacimba Nova, Bagre, Copiti, Moxotó, Barreiro, Campos e Barro Branco. O Quadro 8 a seguir mostra um resumo das características físicas dos reservatórios, bem como informações acerca de suas funções e localização.

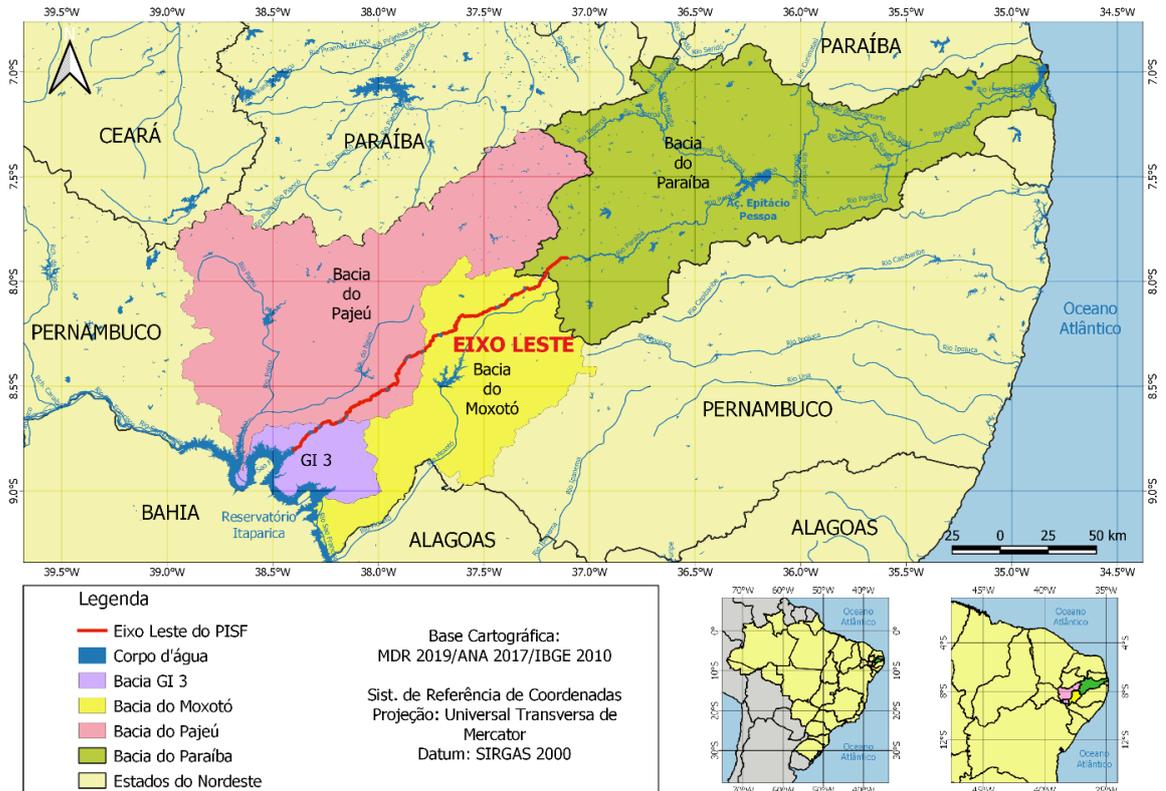
Quadro 8 - Características dos reservatórios projetados do Eixo Leste do PISF

Sub-bacia Hidrográfica	Reservatório	Área (km ²)	Volume máximo operacional (m ³)	Função	Município
GI 3	Areias	1,67	7 648 650	Compensação	Floresta
	Braúnas	1,31	15 170 730	Compensação	
	Mandantes	0,95	3 816 790	Compensação	
Pajeú	Salgueiro	0,83	4 367 190	Compensação	Floresta
	Muquém	0,77	3 080 360	Compensação e derivação de 10m ³ /s para o Açude Barra do Juá	
	Cacimba Nova	0,88	2 700 000	Compensação	Custódia
	Bagres	0,76	2 250 000	Compensação	
Moxotó	Copiti	1,44	6 326 090	Compensação e derivação de 18m ³ /s para o Açude Poço da Cruz	Custódia
	Moxotó	0,52	1 424 240	Compensação	Sertânia
	Barreiro	0,75	2 612 240	Compensação	
	Campos	0,83	4 790 700	Compensação	
	Barro Branco	0,08	268 520	Compensação e derivação de 8m ³ /s para o Açude Ipojuca (Fonte da Adutora do Agreste)	

Fonte: MI (2016a, 2016b, 2016c).

O percurso do Eixo Leste em Pernambuco inclui o Grupo de bacias de pequenos rios interiores 3 – GI3, a bacia do rio Moxotó e a do rio Pajeú (Figura 8), que fazem parte da bacia hidrográfica do rio São Francisco. Ao ocorrer efetivamente o evento de mistura de bacias, onde a bacia do rio Paraíba receberá as águas do PISF, esse volume será conduzido de forma a incrementar a vazão do rio que dá nome à bacia receptora, e distribuído nos açudes Poções e Camalaú, Epitácio Pessoa e Acauã.

Figura 8 - Localização das bacias do Eixo Leste do PISF



Fonte: A autora (2021).

Os três primeiros açudes da bacia do rio Paraíba que recebem as águas do PISF serão avaliados neste trabalho, sendo, em sequência: Poções, Camalaú e Epitácio Pessoa (Quadro 9). Dentre eles, o Açude Epitácio Pessoa (também conhecido como Boqueirão) se destaca por ser responsável pelo abastecimento de 24 municípios, incluindo Campina Grande, constituindo a segunda maior reserva hídrica do estado (ANA, 2017b).

Quadro 9 - Características dos açudes da bacia do rio Paraíba

Açude	Área de drenagem (km ²)	Volume total (hm ³)	Usos principais	Municípios
Poções	670,0	29,86	Irrigação e abastecimento público	Monteiro
Camalaú	1.061,4	46,44	Abastecimento público	Camalaú
Epitácio Pessoa	12.394,5	411,69	Abastecimento público, irrigação, pesca artesanal	Boqueirão, Cabaceiras e Barra de São Miguel

Fonte: ANA (2017b).

Devido à seca que afeta a região semiárida nas últimas décadas, Boqueirão apresentou os menores volumes acumulados em todo o seu histórico, chegando a aproximadamente 12

hm³ (2,9%) em abril de 2017 e, desde então, vem aumentando progressivamente o seu volume em razão da pré-operação do Eixo Leste do PISF (GONDIM et al., 2017).

3.2 AMOSTRAGEM E ANÁLISES DA QUALIDADE DA ÁGUA

Os dados físico-químicos e biológicos para avaliação da qualidade da água que foram utilizados nesta pesquisa, são provenientes do Programa de Monitoramento da Qualidade da Água e Limnologia - PBA 22 do PISF. A realização do PBA 22 se dá por meio da parceria entre o Ministério do Desenvolvimento Regional e a Universidade Federal de Pernambuco - UFPE. Vinculado ao Departamento de Engenharia Civil da UFPE, o Grupo de Gestão Ambiental - GGA é responsável pela coordenação das atividades do referido PBA. Este programa foi previsto como uma condicionante do IBAMA para o processo de licenciamento ambiental do empreendimento, e o monitoramento teve início no ano de 2009, paralelamente às atividades de implantação do projeto.

Ao todo, o monitoramento acompanha 86 pontos de coleta distribuídos ao longo dos dois eixos do PISF e dos reservatórios de Sobradinho e Itaparica. Em meio às bacias que compõem todo o Eixo Leste, em totalidade existem 31 estações de monitoramento. Para esta pesquisa, no entanto, foram selecionadas apenas 19 estações (Quadro 10), que fornecem dados do trecho entre os reservatórios projetados até o açude Epitácio Pessoa, na bacia do rio Paraíba. A localização dos pontos que foram selecionados neste trabalho é mostrada na Figura 9.

Quadro 10 - Estações de amostragem selecionadas, suas localizações e respectivos tipos de ambientes onde se encontram

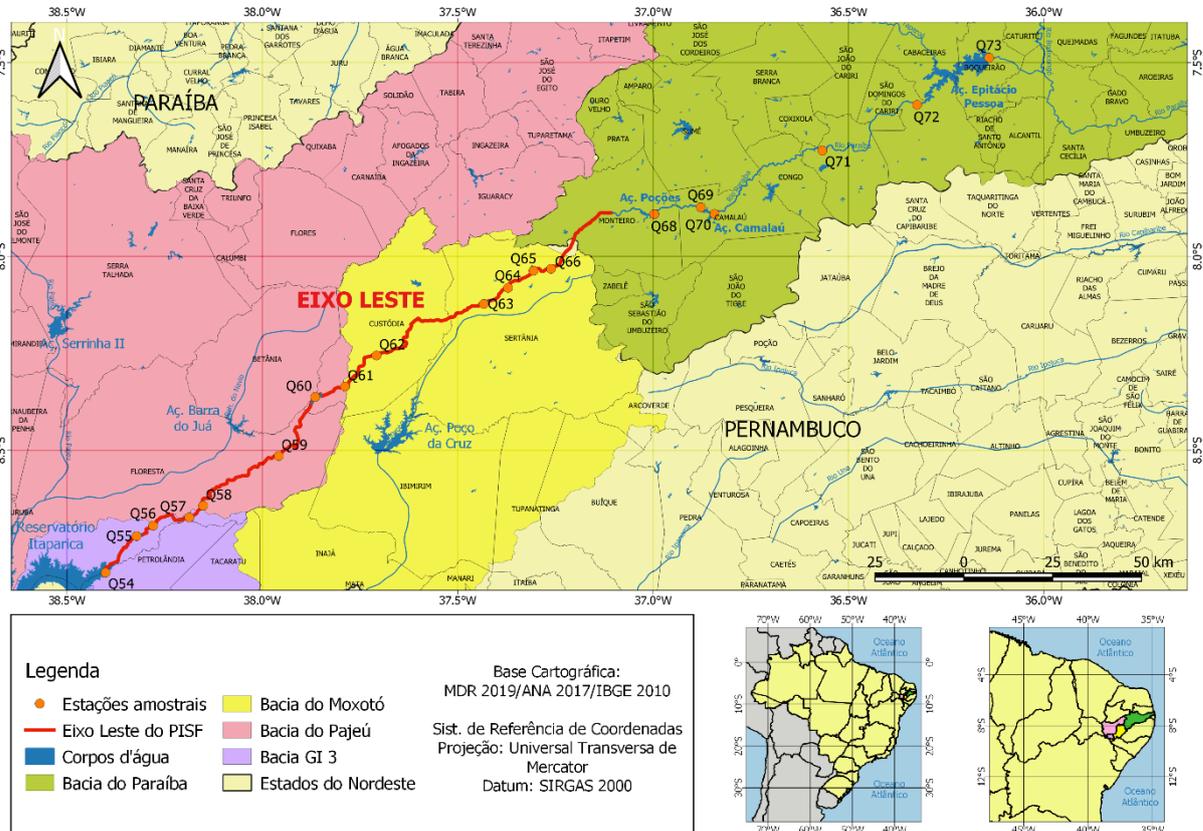
Ponto	Descrição	Coordenadas*		Tipo de Ambiente	Bacia hidrográfica
		X	Y		
Q54	Reservatório Itaparica - Captação Eixo Leste	565518	9024768	Lêntico	GI 3
Q55	Reservatório Areias	574830	9036088	Lêntico	
Q56	Reservatório Braúnas	579422	9038852	Lêntico	
Q57	Reservatório Mandantes	589703	9041371	Lêntico	
Q58	Reservatório Salgueiro	593404	9044460	Lêntico	Rio Pajeú
Q59	Reservatório Muquém	614772	9058532	Lêntico	
Q60	Reservatório Cacimba Nova	625153	9075260	Lêntico	
Q61	Reservatório Bagres	633322	9078500	Lêntico	
Q62	Reservatório Copiti	642264	9087258	Lêntico	Rio Moxotó
Q63	Reservatório Moxotó	673635	9102622	Lêntico	
Q64	Reservatório Barreiros	679224	9106365	Lêntico	

Ponto	Descrição	Coordenadas*		Tipo de	Bacia
Q65	Reservatório Campos	686594	9111320	Lêntico	Rio Paraíba
Q66	Reservatório Barro Branco	691687	9111867	Lêntico	
Q68	Açude Poções (Eixo)	720790	9127416	Lêntico	
Q69	Montante do Remanso do Açude Camalaú	733014	9129378	Lótico	
Q70	Açude Camalaú (Eixo)	738913	9127554	Lêntico	
Q71	Rio do Meio - Caraúba/PB	775793	9146108	Lótico	
Q72	Remanso Açude Epitácio Pessoa (Boqueirão)	796969	9168076	Lêntico	
Q73	Açude Epitácio Pessoa (Boqueirão)	815673	9171362	Lêntico	

*Sistema de Projeção UTM, Datum SAD-69.

Fonte: MI (2004).

Figura 9 - Localização das estações de monitoramento da qualidade da água avaliadas nesta pesquisa ao longo do Eixo Leste



Fonte: A autora (2021).

Foram analisados ao todo 21 parâmetros de qualidade da água: temperatura, oxigênio dissolvido, pH, salinidade, turbidez, condutividade elétrica, alcalinidade total, clorofila-a, coliformes termotolerantes, demanda bioquímica de oxigênio, demanda química de oxigênio, dureza total, feofitina-a, fósforo reativo solúvel (ortofosfato), fósforo total, nitrato, nitrito, nitrogênio amoniacal, nitrogênio total, sólidos dissolvidos totais e sólidos suspensos totais.

As amostras foram coletadas pela equipe da CMT Engenharia Ambiental, que também realiza a avaliação de determinados parâmetros em campo, e transportadas para os respectivos laboratórios onde são realizadas as demais análises. Foram consideradas para este estudo os dados das amostras coletadas na superfície, a uma profundidade aproximada de 30 cm, com o auxílio de garrafa de *Van Dorn*. A aferição dos resultados das análises das variáveis físico-químicas e biológicas seguiu metodologias descritas em bibliografia técnica (Quadro 11), sendo executadas pelo laboratório AgroSafety Monitoramento Agrícola, que é devidamente credenciado e certificado pelo INMETRO.

Quadro 11 - Variáveis físico-químicas e biológicas de campo e de laboratório com suas respectivas metodologias de análise

Campo				
Variáveis	Sigla	Unidade	Método	
Temperatura	Temp	°C	Sonda multiparamétrica (Horiba, modelo B-213)	
Oxigênio Dissolvido	OD	mg/L O ₂		
pH	pH	-		
Salinidade	Sal	‰		
Turbidez	Turb	UNT		
Condutividade elétrica	CE	µS/cm		
Laboratório				
Variáveis	Sigla	Unidade	LQ	Referência do Método
Alcalinidade Total	AT	mg/L CaCO ₃	10	POPMET360
Clorofila-a	Cl-a	µg/L	5,5	POPMET391, SMWW 22ª Edição 2012 - Método 10200 H
Coliformes termotolerantes	Coli	NMP/100 ml	1	POPMET397, SMWW 22ª Edição 2012
Demanda Bioquímica de Oxigênio	DBO	mg/L O ₂	2	POPMET357, SMWW 22ª Edição 2012 - Método 5210 B
Demanda Química de Oxigênio	DQO	mg/L O ₂	2	POPMET379
Dureza Total	DT	mg/L CaCO ₃	10	POPMET359
Feofitina-a	Feo-a	µg/L	10	POPMET391, SMWW 22ª Edição 2012 - Método 10200 H
Fósforo Reativo Solúvel (Ortofosfato)	P-Orto	mg/L	0,1	POPMET355
Fósforo Total	PT	mg/L	0,1	POPMET375, SMWW 23ª Edição 2017 - Métodos 3030 E e 3120 B
Nitrato	NO ₃	mg/L N	0,02	POPMET352
Nitrito	NO ₂	mg/L N	0,002	POPMET351
Nitrogênio Amoniacal	NH ₃	mg/L N	0,01	POPMET347

Nitrogênio Total	NT	mg/L N	0,5	POPMET348
Sólidos Dissolvidos Totais	SDT	mg/L	10	POPMET236, SMWW 22ª Edição 2012 - Método 2540
Sólidos Suspensos Totais	SST	mg/L	10	POPMET354, SMWW 22ª Edição 2012 - Método 2540 D

Fonte: Adaptado de MI (2004).

Os resultados selecionados são relativos às campanhas 16 a 25 do PBA 22 do PISF, realizadas entre os anos 2014 a 2019 (Quadro 12). Cabe ressaltar que os reservatórios projetados do Eixo Leste só começaram a apresentar dados de qualidade da água a partir da 22ª campanha, realizada em 2017, correspondente ao início do período de pré-operação deste eixo, quando a bacia do rio Paraíba começa a receber as águas do rio São Francisco.

Quadro 12 - Campanhas de monitoramento da qualidade da água do Eixo Leste do PISF analisadas na pesquisa, incluindo as datas e o clima no período das coletas

Campanha	Meses de execução	Ano	Período
16	fevereiro a abril	2014	chuvoso
17	agosto a outubro	2014	seco
18	fevereiro a maio	2015	chuvoso
19	agosto a outubro	2015	seco
20	abril a junho	2016	chuvoso
21	outubro	2016	seco
22	março a junho	2017	chuvoso
23	agosto a dezembro	2017	seco
24	agosto a novembro	2018	seco
25	março a junho	2019	chuvoso

Fonte: Adaptado de Ferreira (2016).

Os resultados obtidos dos parâmetros que possuem referência, foram relacionados aos padrões indicados na Resolução nº 357/2005 do CONAMA (Tabela 1), que estabelece limites para qualidade da água em rios de águas doces Classe 2, ao qual está proposto o enquadramento da calha principal do rio São Francisco, e enquadrado o trecho em estudo do rio Paraíba (IBAMA, 1989; SUDEMA, 1988).

Tabela 1 - Parâmetros de qualidade da água utilizados na pesquisa que possuem valores máximos permitidos de acordo com a Resolução CONAMA nº 357/2005

Parâmetros	Valor máximo permitido
Temperatura	40°C
Oxigênio dissolvido (OD)	≥ 5 mg/L O ₂
pH	6 a 9

Parâmetros	Valor máximo permitido
Turbidez	100 UNT
Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)	5 mg/L O ₂
Fósforo total	0,030 mg/L P em ambientes lênticos 0,050 mg/L P em ambientes intermediários
Nitrito	1 mg/L N
Nitrato	10 mg/L N
Nitrogênio Amoniacal	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
Nitrogênio total	1,27 mg/L N em ambientes lênticos
	2,18 mg/L N em ambientes lóticos
Sólidos Dissolvidos Totais	500 mg/L
Coliformes termotolerantes	1.000 NMP/100 mL
Clorofila-a	≤ 30 µg/L

Fonte: CONAMA (2005).

3.3 CÁLCULO DOS ÍNDICES PARA AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA

Para avaliação da qualidade da água nos pontos ao longo do Eixo Leste, foram determinados os seguintes índices: Índice de Qualidade da Água (IQA) e Índice de Estado Trófico (IET), ambos calculados de acordo com CETESB (2019a).

3.3.1 Índice de Qualidade da Água (IQA)

O IQA é uma adaptação do índice de qualidade de água da National Sanitation Foundation (NSF) dos Estados Unidos, desenvolvido em 1970. Foi adaptado pela CETESB, incorporando variáveis de qualidade que refletem, principalmente, a contaminação dos corpos hídricos ocasionada pelo lançamento de esgotos domésticos. O índice foi desenvolvido para avaliar a qualidade das águas destinadas ao abastecimento público, considerando aspectos relativos ao tratamento dessas águas. O cálculo do IQA é realizado através do produtório ponderado dos valores obtidos para as variáveis que compõem o índice, representado pela Equação 1:

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

Onde:

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

q_i 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;

w_i Peso correspondente ao i -ésimo parâmetro, um número entre 0 e 1, atribuído em função da sua importância para a conformação global de qualidade;

n Número de variáveis que entram no cálculo do IQA.

Os parâmetros utilizados para o cálculo deste índice são: coliformes fecais, pH, DBO, nitrogênio total, fósforo total, temperatura, turbidez, sólidos totais e oxigênio dissolvido. A ausência de qualquer uma dessas variáveis inviabiliza a realização do cálculo do IQA. O peso atribuído a cada parâmetro de acordo com sua importância relativa no cálculo do IQA é especificado na Tabela 2.

Tabela 2 - Peso relativo dos parâmetros utilizados no Índice de Qualidade de Água

Parâmetros	Peso (w)
Oxigênio dissolvido	0,17
Coliformes termotolerantes	0,15
pH	0,12
Demanda bioquímica de oxigênio	0,10
Nitrogênio total	0,10
Fósforo total	0,10
Diferença de temperatura	0,10
Turbidez	0,08
Sólidos totais	0,08

Fonte: CETESB (2019a).

A partir do cálculo efetuado, o IQA indica um valor numa escala de 0 a 100 que representa a qualidade da água bruta em cinco categorias, representadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Categorias e valores de ponderação resultantes do cálculo do Índice de Qualidade da Água – IQA

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

Fonte: CETESB (2019a).

3.3.2 Índice de Estado Trófico (IET)

O Índice do Estado Trófico é aplicado para estabelecer o grau de trofia do corpo hídrico, avaliando a qualidade da água em relação ao enriquecimento por nutrientes e seus efeitos relacionados ao crescimento excessivo de algas e cianobactérias. Para o cálculo deste índice, são utilizadas as variáveis clorofila-a e fósforo total.

Nesse índice, os resultados correspondentes ao fósforo devem ser entendidos como uma medida do potencial de eutrofização, já que este nutriente atua como o agente causador do processo. Já a avaliação correspondente à clorofila-a, deve ser considerada como uma medida da resposta do corpo hídrico ao agente causador, indicando de forma adequada o nível de crescimento de algas que tem lugar em suas águas. Assim, o índice médio engloba a causa e o efeito do processo.

O cálculo de IET possui variações em sua fórmula entre os ambientes lênticos e os lóticos, conforme demonstrado nas Equações 2, 3, 4 e 5.

Ambientes lóticos (rios):

$$IET (CL) = 10 \times (6 - ((-0,7 - 0,6 \times (\ln CL))/\ln 2)) - 20 \quad (2)$$

$$IET (PT) = 10 \times (6 - ((0,42 - 0,36 \times (\ln PT))/\ln 2)) - 20 \quad (3)$$

Ambientes lênticos (reservatórios):

$$IET (CL) = 10 \times (6 - ((0,92 - 0,34 \times (\ln CL))/\ln 2)) \quad (4)$$

$$IET (PT) = 10 \times (6 - ((1,77 - 0,42 \times (\ln PT))/\ln 2)) \quad (5)$$

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 valor final no IET é resultante de uma média aritmética simples dos índices obtidos para o fósforo total e a clorofila-a, aplicando-se a Equação 6.

$$IET = [IET(PT) + IET(CL)]/2 \quad (6)$$

Os valores do IET encontrados serão enquadrados nos limites estabelecidos para as diferentes classes de trofia para rios e reservatórios, descritos nas Tabelas 4 e 5.

Tabela 4 - Classificação do Estado Trófico para rios

Categoria (Estado Trófico)	Ponderação	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 (2019a).

Tabela 5 - Classificação do Estado Trófico para 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 (2019a).

3.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA MULTIVARIADA

A tabulação de dados de programas de monitoramento da qualidade da água para diversas campanhas ao longo do tempo, resulta em uma grande e complexa matriz de dados. Para a interpretação desse grande volume de informações, podem ser empregadas técnicas de análise estatística multivariada que abordam as diferentes variáveis de forma conjunta e simultaneamente (GOTELLI; ELLISON, 2011).

A partir dos resultados dos dados coletados no monitoramento do PISF durante as campanhas 16 a 25, foi realizada a análise estatística multivariada através das técnicas de Análise de Componentes Principais (*Principal Component Analysis*) e Análise de Agrupamentos (*Cluster Analysis*). Para isso, ambas foram executadas no programa computacional livre “R” versão 3.6.1 (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2019), mediante o uso de pacotes que efetuam determinadas funções em um script.

3.4.1 Análise de Componentes Principais (ACP)

A Análise de Componentes Principais é um método que tem por objetivo reduzir a dimensionalidade de dados multivariados através da criação poucas variáveis-chave (compostas pelas variáveis originais) que caracterizam ao máximo possível a variação no conjunto de dados multivariados com uma perda mínima de informação. As novas variáveis geradas pela ACP não são correlacionadas entre si, e as componentes que expliquem a maior variabilidade são escolhidas de modo a caracterizar a base de dados. Em bases ecológicas típicas, a maioria da variação nos elementos é capturada pelas primeiras componentes principais, podendo-se descartar as demais que explicam a variação residual (HAIR et al., 2009; GOTELLI; ELLISON, 2011).

Para que a aplicação da ACP seja bem sucedida, são necessários requisitos como uma forte intercorrelação entre as variáveis originais e a padronização dos dados. A padronização é necessária para que todas as variáveis possam ter a mesma escala relativa, e é obtida usando transformações como a da Equação 7:

$$Z = \frac{(Y_i - \bar{Y})}{s} \quad (7)$$

Onde:

Y_i Valor de cada observação da variável;

\bar{Y} Média amostral;

s Desvio-padrão amostral.

Existem diversos métodos na literatura para a seleção das n componentes mais importantes. Nesta pesquisa, foi aplicado um dos mais frequentemente utilizados, que consiste em reter os que explicam mais de 70% da variabilidade total (JOLLIFFE; CADIMA, 2016). Também pode ser utilizada uma ferramenta que indica uma separação visual dessas componentes, o *screeplot* ou gráfico de sedimentação. Trata-se do gráfico de autovalores da matriz de covariância em função das componentes principais, que ilustra a porcentagem de variação (autovalor) em ordem decrescente explicada por cada componente. O ponto onde se observa uma estabilização da variância explicada, indica o número de componentes que se deveria reter (PALACIO et al., 2020).

Após selecionadas as componentes principais, dentro destas foram consideradas as variáveis que apresentaram coeficiente de correlação com maior proximidade a 1 ou -1. Estes são os que possuem maior influência na variabilidade dos dados, sendo então classificados

como os valores mais representativos. Segundo Hair et al. (2009), ao ser utilizado esse critério, devem ser selecionadas as variáveis que apresentam coeficiente de determinação maior ou igual a $\pm 0,5$, para uma significância prática.

Para a aplicação da técnica ACP aos dados no software R, foi utilizado pacote *FactoMineR*, que executa automaticamente a padronização dos dados para eliminar o efeito de escala e unidades, através da conversão das variáveis para escores padrões. Foram utilizadas as funções *fviz_eig()* para gerar o gráfico de sedimentação e *fviz_pca_biplot()* para gerar o gráfico biplot, ambas do pacote *factoextra*.

3.4.2 Análise de Agrupamentos

De forma simplificada, a análise de agrupamentos é uma técnica que tem como objetivo classificar uma amostra de entidades (indivíduos ou objetos), identificando subgrupos com base na similaridade entre as entidades. A ideia central é maximizar a semelhança de objetos dentro de grupos, ao mesmo tempo em que se maximiza a diferença entre os grupos. (HAIR et al., 2009; GOTELLI; ELLISON, 2011).

Dentre os diversos métodos existentes para aplicar a análise de agrupamentos, nesta pesquisa foi utilizado o método hierárquico aglomerativo para definir a semelhança (ou diferença) entre os elementos. Adotou-se a combinação da distância euclidiana quadrada (Squared Euclidean Distance) para formação da matriz de similaridade, e o método de Ward para formação dos agrupamentos, arranjo que vem sendo frequentemente empregado em estudos que envolvem qualidade da água (PALÁCIO et al., 2011; GOMES; CAVALCANTE, 2017; FRANCA et al., 2018).

Como representação gráfica dos resultados de um procedimento hierárquico, tem-se um dendrograma, que é um gráfico em formato de árvore cujo intuito é ilustrar o passo a passo dos agrupamentos e facilitar a visualização da alocação de cada observação em cada estágio até que todos estejam contidos em um único agrupamento (HAIR et al., 2009; FÁVERO; BELFIORE, 2017).

A interpretação básica é que quanto menor a distância entre os pontos no dendrograma, maior a semelhança entre as amostras. O corte do dendrograma que estabelece os *clusters* no presente estudo foi determinado em relação às maiores distâncias em que os grupos foram formados, e posterior análise dos agrupamentos formados com o conhecimento prévio dos dados para uma decisão lógica do número de grupos.

Devido ao grande volume de dados coletados para as dez campanhas estudadas nessa pesquisa, os dados médios de cada parâmetro foram analisados considerando dois períodos distintos: as campanhas realizadas nas estações chuvosa e seca para cada ponto de monitoramento.

Para a aplicação da Análise de Agrupamento Hierárquica no software R, inicialmente foi executada a padronização dos dados para eliminar o efeito de escala e unidades através da função *scale()*. Em seguida, foi utilizada a função *dist()* para o cálculo da matriz de similaridade. A função *hclust()* foi usada para aplicar o método de Ward e a função *fviz_dend()* do pacote *factoextra* para gerar a visualização do dendrograma.

3.5 ANÁLISE DA GESTÃO AMBIENTAL E DE RECURSOS HÍDRICOS NO EIXO LESTE

A análise da gestão ambiental e de recursos hídricos da área de estudo foi desenvolvida com o intuito de identificar os aspectos gerais relacionados à gestão operante nos reservatórios e municípios percorridos pelo Eixo Leste, como as licenças ambientais existentes, os planos ambientais de conservação dos reservatórios, as outorgas de uso da água e os sistemas de abastecimento de água que já recebem ou irão receber volumes provenientes do PISF. A sua elaboração foi estruturada a partir das informações coletadas através de levantamentos documental e bibliográfico, além de visita de campo acompanhada por equipe do MDR relacionada às obras do empreendimento, em conjunto com a equipe de coleta de amostras de qualidade da água.

Foram consultados os seguintes documentos nesta etapa da pesquisa:

- Decreto nº 5995/2006 que institui o Sistema de Gestão do PISF – SGIB;
- Licença Prévia nº 200/2005 expedida pelo IBAMA;
- Licença de Operação nº1464/2018 expedida pelo IBAMA;
- Resolução nº 411/2005 da ANA, que dispõe sobre a Outorga do Direito de Uso de Recursos Hídricos;
- Resolução nº 59/2020 da ANA, correspondente ao Plano de Gestão Anual – PGA referente ao ano de 2021 para o PISF; e
- Diagnósticos Socioambientais das sub-bacias GI3, Moxotó e Pajeú, que fazem parte do Plano Ambiental de Conservação e Uso do Entorno dos Reservatórios Artificiais (PACUERA).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos com a aplicação da metodologia descrita anteriormente, iniciando pela análise dos parâmetros físico-químicos, seguida pelos índices de qualidade da água e índices de estado trófico dos pontos avaliados, as análises estatísticas, a análise da gestão ambiental e de recursos hídricos no Eixo Leste, além da discussão relativa a trabalhos similares e com resultados que confirmam ou não os encontrados nesta pesquisa.

4.1 ANÁLISE DOS PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS

Parar avaliar a qualidade da água, foram analisados os resultados de coletas em 19 estações de monitoramento, distribuídas pelas bacias hidrográficas GI 3 (Q54 a Q57), do rio Pajeú (Q58 a Q61), do rio Moxotó (Q62 a Q66) e do rio Paraíba (Q68 a Q73). As estações compreendem desde as proximidades do ponto de captação do Eixo Leste, passando pelos reservatórios projetados e açudes que recebem as águas do PISF na Paraíba.

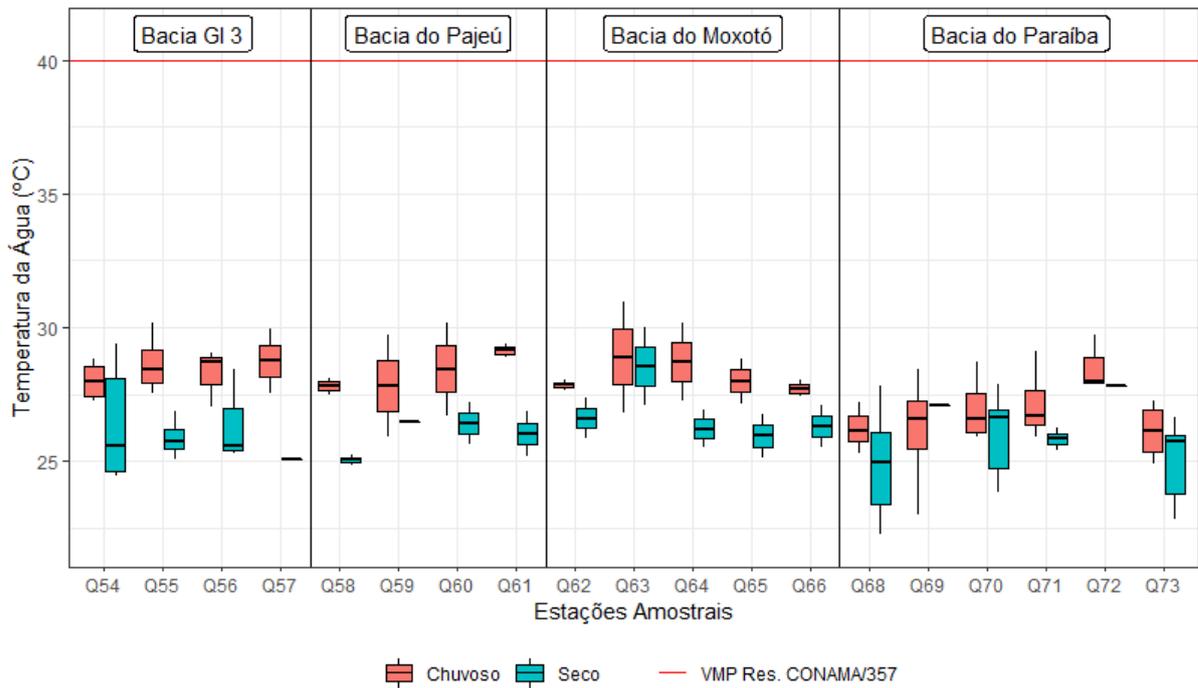
O período de análise correspondeu às campanhas realizadas entre os anos de 2014 a 2019. Ao longo desse período, à medida que ocorreu a finalização das obras dos reservatórios projetados e estes passaram a acumular água é que foram sendo realizadas suas coletas. Portanto, nem todas as campanhas analisadas contém dados de todas as estações. Outro caso particular são os pontos localizados na bacia do Paraíba, que em diversas ocasiões apresentavam-se secos devido à estiagem ocorrida na região à época.

Os resultados das análises de todos os parâmetros avaliados encontram-se na Tabela 16, no Anexo A. A localização dos pontos de amostragem encontra-se ilustrada na Figura 9. Os resultados com valores abaixo do limite de quantificação não foram considerados na construção dos *boxplots*.

Em relação à temperatura da água, todos os pontos apresentaram valores reduzidos em algumas campanhas no período seco. A menor temperatura registrada foi 22,24 °C em 2014 na estação Q68 durante a campanha 17, enquanto 30,97 °C foi a maior, verificada no ponto Q63 na campanha 25, em 2019, no período chuvoso.

Comparando o antes e depois da operação do PISF, não foram identificadas diferenças significativas nos resultados obtidos para temperatura da água nos pontos avaliados. As variações desse parâmetro nas estações analisadas revelam que as maiores amplitudes podem ser identificadas em pontos na bacia GI3 e na bacia do Paraíba (Figura 10).

Figura 10 - Variação da temperatura da água nos pontos amostrais das bacias hidrográficas GI3, do rio Moxotó, do rio Pajeú e do rio Paraíba, nos períodos chuvosos e secos dos anos de 2014 a 2019



Fonte: A autora (2021).

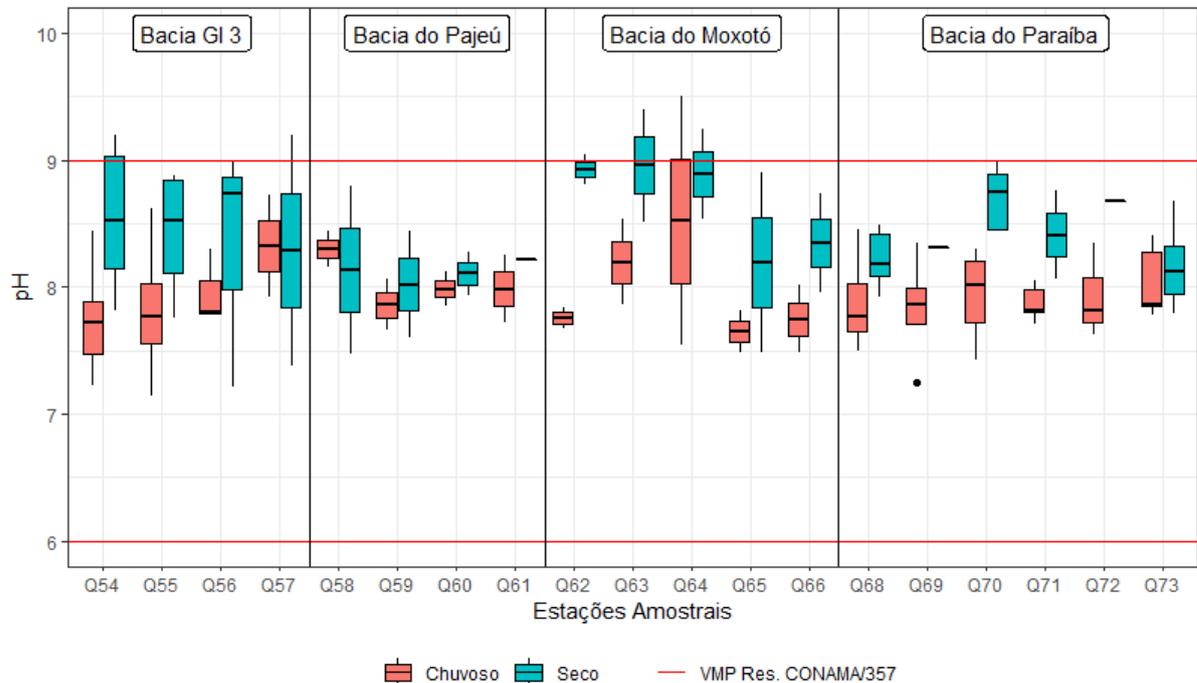
O regime térmico de corpos de água é afetado fundamentalmente por fatores como a radiação solar, que provoca a variação no aquecimento atmosférico influenciando a temperatura do ar, e a profundidade do corpo de água, que pode favorecer a estratificação vertical (TUNDISI; TUNDISI, 2008; ESTEVES, 2011). Os valores de temperatura da água obtidos neste estudo são semelhantes aos vistos em outros estudos também realizados no Semiárido (CARVALHO et al., 2008; LIMA; GARCIA, 2008; BARRETO; ROCHA; OLIVEIRA, 2009; GARCIA et al., 2012; SILVA; CASÉ; LOPES, 2019).

Os resultados para o pH estiveram dentro dos valores máximos permitidos de acordo com a Resolução CONAMA nº 357/2005 para águas doces Classe 2 na maioria das amostras durante o período analisado (Figura 11). O menor valor encontrado foi 7,14, ocorrido na campanha 18 (período chuvoso) no ponto Q55. Os pontos Q54 e Q57, na bacia GI3, e Q63 e Q64, na bacia do Moxotó, foram os que apresentaram maior frequência de valores acima do permitido, sendo 9,5 o maior valor encontrado, ocorrido no ponto Q64 na campanha 25, em 2019, no período chuvoso. Essa foi a única oportunidade em que os valores acima do limite permitido ocorreram no período chuvoso.

A maioria dos episódios de violação do limite máximo permitidos aconteceram durante a campanha 23, sendo 9,4 no ponto Q63 o segundo maior valor encontrado entre todas as amostras avaliadas. Analisando os resultados a jusante do ponto Q64 nesse período,

foi possível verificar que o pH ainda apresentou valores elevados, porém não ultrapassou o valor máximo permitido.

Figura 11 - Variação do pH nos pontos amostrais das bacias hidrográficas GI3, do rio Moxotó, do rio Pajeú e do rio Paraíba, nos períodos chuvosos e secos dos anos de 2014 a 2019



Fonte: A autora (2021).

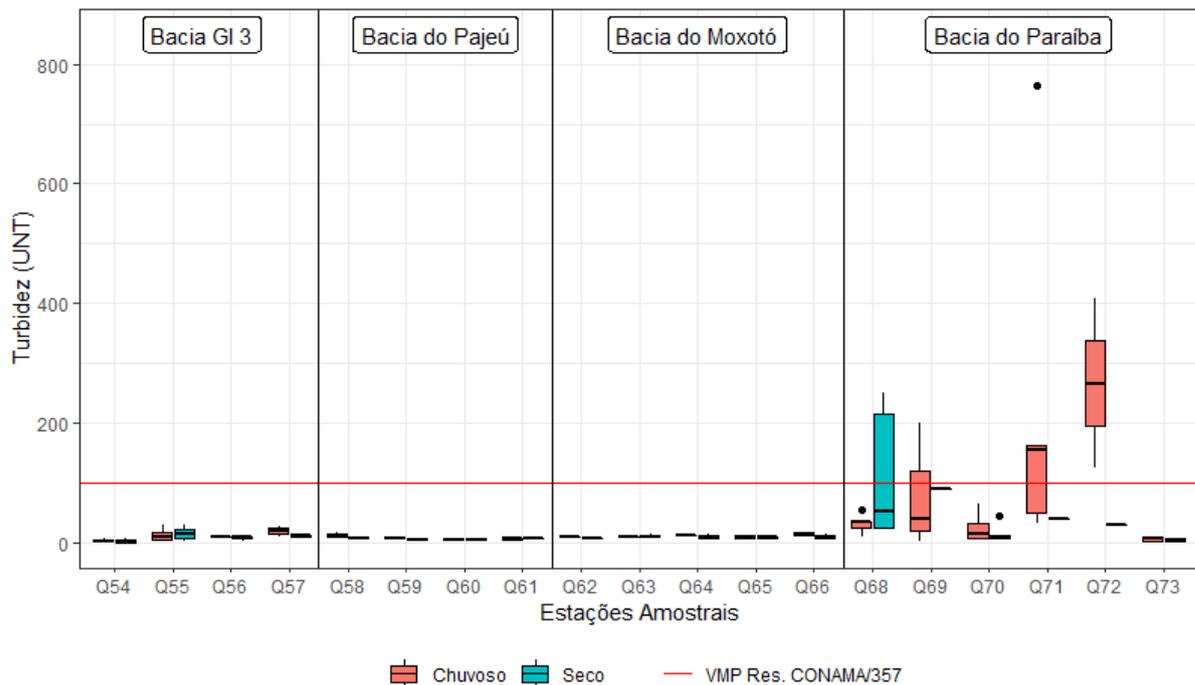
O pH é uma variável que revela o tipo de solo por onde a água circula, e geralmente quando se mostra muito ácido ou muito alcalino está associado à presença de despejos industriais (SILVA; GALVÍNCIO; ALMEIDA, 2010). No caso de regiões onde ocorre alta insolação, como as regiões semiáridas, as concentrações de carbonatos e bicarbonatos aumentam devido à alta taxa de evaporação da água, ocasionando também um aumento nos valores de pH (ESTEVES, 2011).

A faixa de valores de pH encontrados nesta pesquisa para o ponto Q54, localizado no reservatório Itaparica, estão de acordo com as encontradas por Melo (2007) e Gunkel (2012). Andrade, Andrade e Araújo (2017) compararam valores de pH da água do açude Epitácio Pessoa (aqui representado pelos pontos Q72 e Q73) antes e depois da pré-operação do PISF. Os resultados encontrados revelaram médias de 7,9 antes e 7,7 após a chegada da água, demonstrando sensível diminuição em relação a esse parâmetro.

Os valores de turbidez foram praticamente constantes na maioria das campanhas analisadas, exceto pelos pontos Q68, Q69, Q70, Q71 e Q72, localizados na bacia do Paraíba (Figura 12). Nesses pontos foram identificados valores acima dos máximos permitidos pela

Resolução CONAMA nº 357/2005 para águas doces Classe 2, em sua maioria no período chuvoso, exceto pelo ponto Q68 que apresentou máximos de 250 e 216 UNT nas campanhas 19 e 24, respectivamente, no período seco. O maior valor encontrado foi 765 UNT, e se apresenta como um *outlier* do ponto Q71, ocorrido na campanha 18 em 2015. O ponto Q72 esteve sem água na maior parte das campanhas analisadas, e as onde foi possível realizar coleta transcorreram durante o período chuvoso, com valores acima do limite permitido.

Figura 12 - Variação da turbidez nos pontos amostrais das bacias hidrográficas GI3, do rio Moxotó, do rio Pajeú e do rio Paraíba, nos períodos chuvosos e secos dos anos de 2014 a 2019



Fonte: A autora (2021).

Silva, Casé e Lopes (2019) obtiveram resultados semelhantes ao avaliar a turbidez em pontos da bacia do Paraíba, destacando as atividades antrópicas que podem ter contribuído para elevação dos níveis de turbidez e outros parâmetros, como a existência de pastos e currais, o acesso de animais ao espelho d'água, agricultura, assoreamento e extração de areia encontrados na região.

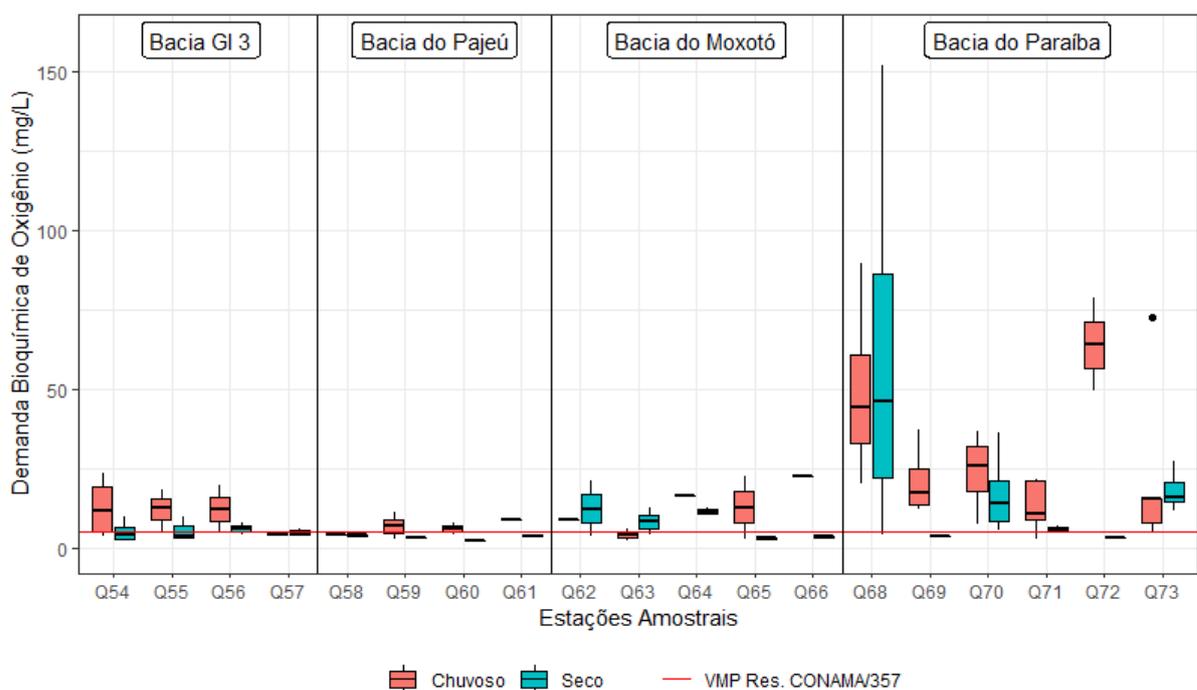
Outro fator de extrema relevância é que alguns pontos da bacia do Paraíba estiveram secos em boa parte das campanhas analisadas, os colocando como mais vulneráveis a valores altos de turbidez. Segundo Tundisi e Tundisi (2008), as oscilações nos níveis de água podem aumentar a erosão das margens de um reservatório, provocando elevação nos níveis de turbidez e outros efeitos negativos sobre a qualidade da água.

A Resolução CONAMA nº 357/2005 recomenda para a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) o valor máximo de 5 mg/L O₂ para águas doces Classe 2, e a maior parte dos resultados obtidos para o período analisado ficou acima desse limite, tanto no período chuvoso quanto no seco (Figura 13).

As estações da bacia do Paraíba se destacaram nesse quesito, sendo encontrada a máxima de 152 mg/L O₂ no ponto Q68 durante o período seco, ocorrido na campanha 19 em 2015. Para esse período, os relatórios da equipe de coleta evidenciaram existência de lama no local, água com coloração esverdeada, presença de material em decomposição, além de cultura irrigada e animais de pastagem nas margens, fatores que contribuem para explicar o elevado valor de DBO. Nas campanhas seguintes ao início da operação do PISF, os valores de DBO dos pontos na bacia do Paraíba se mostraram mais reduzidos, apesar de em algumas ocasiões ainda estarem acima do limite recomendado.

Na bacia GI3, o maior valor encontrado foi 23,60 mg/L O₂, e refere-se ao ponto Q54 na campanha 20 durante o período chuvoso em 2016. A bacia do Pajeú apresentou valores mais constantes, sendo o maior 11,20 mg/L O₂ no ponto Q59 durante a campanha 25 em 2019. O maior resultado para a bacia do Moxotó foi 22,70 mg/L O₂, ocorrido no ponto Q65 também na campanha 25.

Figura 13 - Variação da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) nos pontos amostrais das bacias hidrográficas GI3, do rio Moxotó, do rio Pajeú e do rio Paraíba, nos períodos chuvosos e secos dos anos de 2014 a 2019



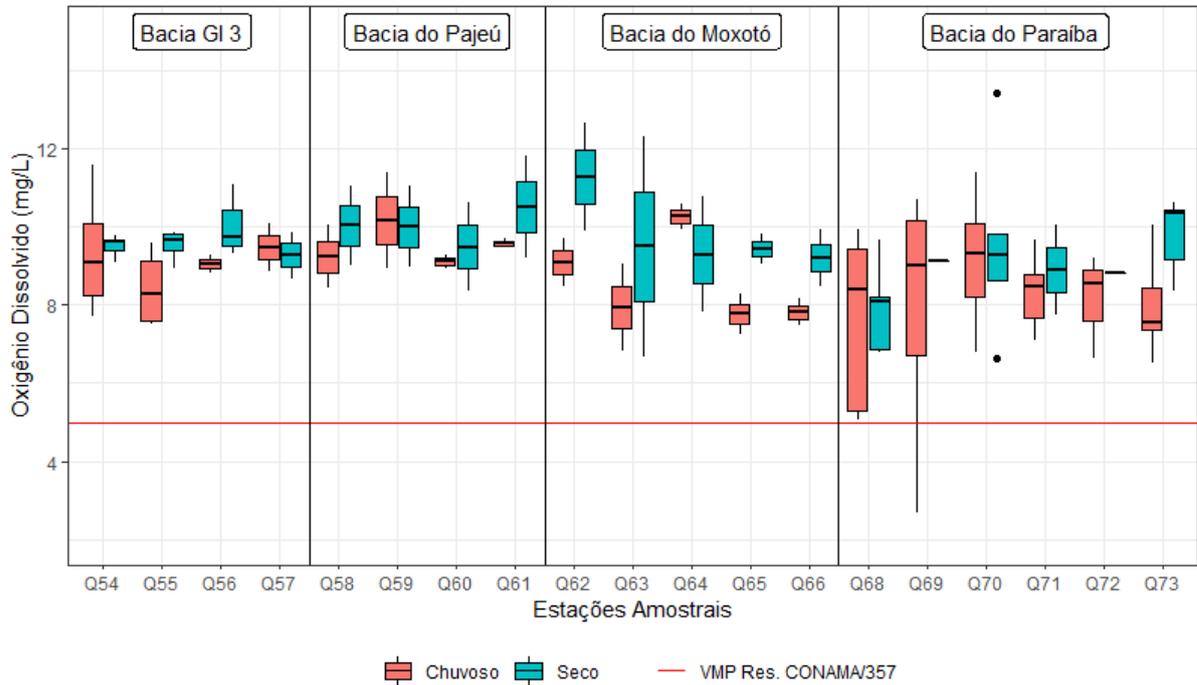
Fonte: A autora (2021).

As concentrações mais elevadas de DBO ocorreram, em sua maioria, durante o período chuvoso, corroborando com a afirmação de Esteves (2011) de que, durante os períodos de chuvas, o efeito da concentração de matéria orgânica aliada às altas temperatura sobre a dinâmica de oxigênio contribui para a desoxigenação da água. De forma semelhante ao encontrado nesta pesquisa, Silva, Casé e Lopes (2019) obtiveram valores acima do recomendado de DBO na bacia do Paraíba e no reservatório Itaparica, apontando as mesmas causas relatadas para a elevação da turbidez e baixas concentrações de oxigênio dissolvido (OD) nas águas. A DBO é definida como a quantidade de oxigênio necessária para oxidar a matéria orgânica por decomposição microbiana aeróbia para uma forma inorgânica estável (CETESB, 2019b), portanto, está relacionada com a concentração do oxigênio dissolvido na água.

Os resultados relativos ao oxigênio dissolvido (OD) obtidos para o período analisado (Figura 14) estão de acordo com a recomendação mínima para água doce Classe 2 (5 mg/L O₂), exceto no ponto Q69 durante o período chuvoso, que atingiu o valor 2,69 mg/L O₂ na campanha 16 em 2014.

O teor de oxigênio OD é muitas vezes crítico, pois indica diretamente o estado do ecossistema aquático e sua capacidade de sustentar a vida dos organismos aquáticos. Baixos teores de OD na água estão relacionados a altas cargas de poluição no corpo hídrico, levando à morte de peixes e outras espécies (NACAR; METE; BAYRAM, 2020). Nas proximidades do ponto amostral foram identificadas pela equipe de coleta áreas de culturas irrigadas e animais de pastagem, o que pode ter influência na redução do teor de OD.

Figura 14 - Variação do oxigênio dissolvido (OD) nos pontos amostrais das bacias hidrográficas GI3, do rio Moxotó, do rio Pajeú e do rio Paraíba, nos períodos chuvosos e secos dos anos de 2014 a 2019

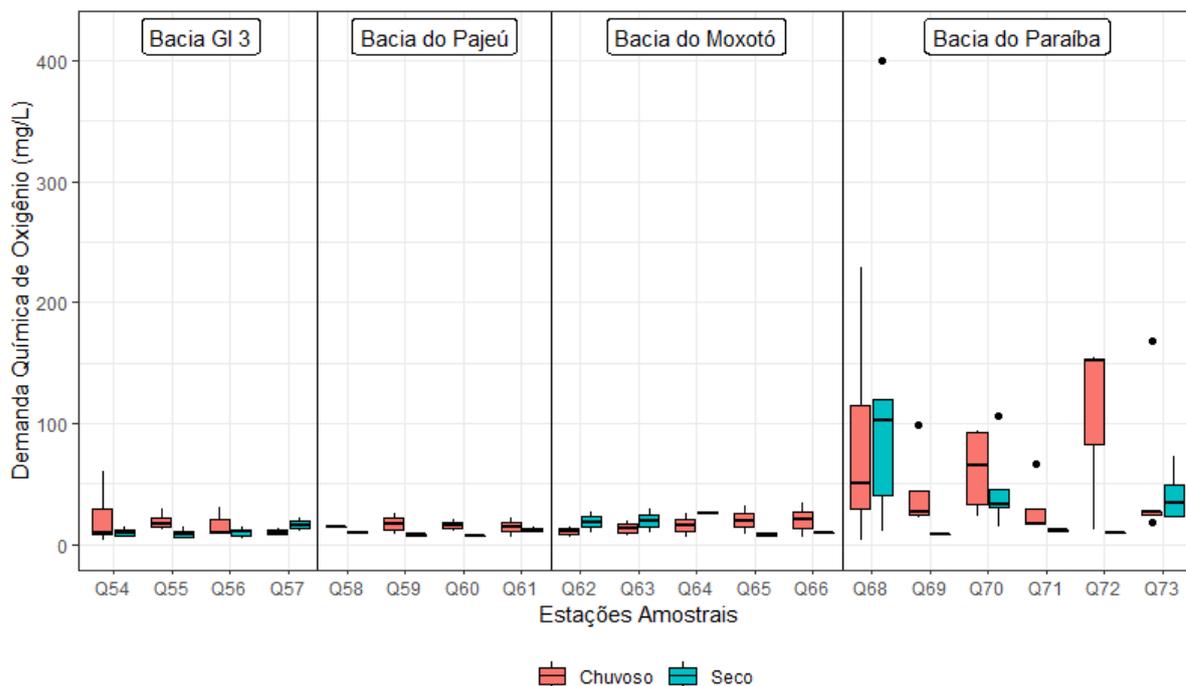


Fonte: A autora (2021).

Os demais resultados variaram de a 5,04 a 13,41 mg/L O₂, com o maior valor sendo registrado como um *outlier* do ponto Q70 no período seco, ocorrido na campanha 21 em 2016. Os menores valores de OD foram geralmente observados no período chuvoso, resultado semelhante ao encontrado por Gonçalves et al. (2012) para o córrego São Simão no estado de São Paulo, onde atribuiu o fato ao aumento da temperatura da água na época de chuva (verão), que ocasiona uma menor solubilidade de gases (OD) na água. Oliveira (2019) também encontrou respostas similares para a região do submédio da bacia do rio São Francisco, no trecho entre os reservatórios de Sobradinho e Itaparica.

Os resultados obtidos para a Demanda Química de Oxigênio (DQO) se mantiveram relativamente constantes ao longo das campanhas analisadas (Figura 15), excetuando-se nos pontos da bacia do Paraíba e ponto Q54 da bacia GI3, os quais registraram maiores amplitudes de variação principalmente durante o período chuvoso. Os valores mínimo e máximo encontrados foram 3,40 mg/L O₂ no ponto Q54 na campanha 25, e 400 mg/L O₂ no ponto Q68 na campanha 19. Na mesma campanha, o ponto Q68 apresentou valores altos para várias variáveis, inclusive o já mencionado valor de 152 mg/L O₂ encontrado para a DBO.

Figura 15 - Variação da demanda química de oxigênio (DQO) nos pontos amostrais das bacias hidrográficas GI3, do rio Moxotó, do rio Pajeú e do rio Paraíba, nos períodos chuvosos e secos dos anos de 2014 a 2019

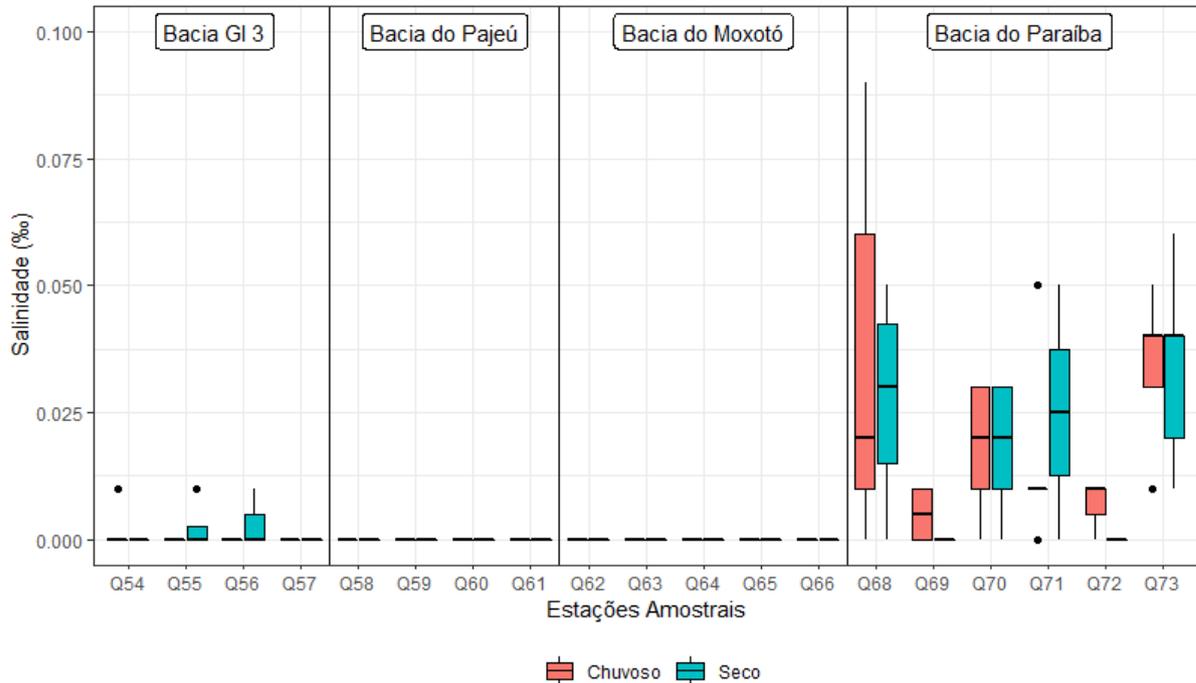


Fonte: A autora (2021).

Segundo Von Sperling (2005) a relação DQO/DBO para esgotos domésticos brutos varia entre 1,7 a 2,4. Durante a campanha 19, o ponto Q68 apresentou relação DQO/DBO de 2,6, confirmando as precárias condições da água naquele momento, podendo ser comparadas a esgoto doméstico. Em consulta ao histórico de monitoramento dos volumes observados no Açude Poções (onde está localizado o ponto Q68), disponibilizado na página web da Agência Executiva de Gestão das Águas do estado da Paraíba (AESAs, 2020), pode-se observar que durante o período de agosto a outubro de 2015 quando foram coletadas as amostras, o volume do corpo hídrico se apresentava abaixo de 1,5%. Esse fato ajuda a explicar os altos índices nas variáveis, pois a diluição da poluição foi prejudicada pelo volume reduzido de água.

Os valores obtidos para a salinidade se mantiveram constantes ao longo do período analisado em todos os pontos localizados nas bacias do Pajeú, do Moxotó e no ponto Q57 da bacia GI3 (Figura 16). As amostras da bacia do Paraíba se mostraram com maiores amplitudes de variação na salinidade, enquanto as dos pontos Q54, Q55 e Q56 na bacia GI3 apresentaram menor variação. O máximo valor registrado foi 0,21‰ durante o período seco no ponto Q68 na campanha 19, que de acordo com a Resolução CONAMA nº 357/2005 pode ser classificado como água doce (salinidade < 0,5‰).

Figura 16 - Variação da salinidade nos pontos amostrais das bacias hidrográficas GI3, do rio Moxotó, do rio Pajeú e do rio Paraíba, nos períodos chuvosos e secos dos anos de 2014 a 2019

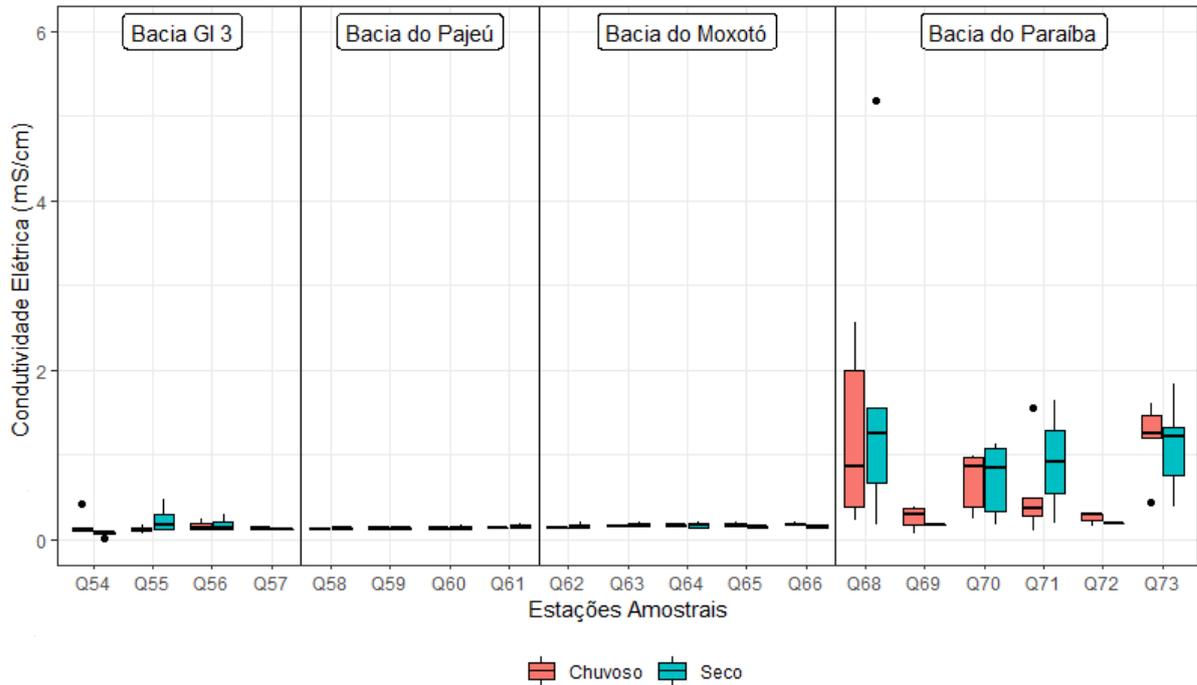


Fonte: A autora (2021).

Após o início da operação do PISF, percebeu-se a diminuição da salinidade das águas da bacia do Paraíba, principalmente nos pontos Q68 e Q73, que apresentaram amostras com maiores níveis de salinidade nas primeiras campanhas analisadas. O fato de a bacia do Paraíba ter sofrido período de grande seca, com seus reservatórios atingindo níveis críticos, ocasiona uma ainda maior concentração dos sais. Este é um efeito comum nas regiões semiáridas, causado pela evaporação dos reservatórios no período mais seco, se agravando com a falta de renovação das águas (PALÁCIO et al., 2011).

A salinidade mede a quantidade de sais dissolvidos nas águas, que por sua vez influenciam na condutividade elétrica, que aumenta à medida que mais sólidos dissolvidos são adicionados a uma amostra (CETESB, 2019b). Assim, os resultados obtidos para a condutividade elétrica seguiram tendência similar aos resultados da salinidade. Novamente, os pontos da bacia do Paraíba apresentaram maiores amplitudes de variação, enquanto os pontos Q54, Q55 e Q56 demonstraram amplitudes menores, e os demais pontos permaneceram constantes (Figura 17). O mínimo valor encontrado foi 0,01 mS/cm no ponto Q54, durante a campanha 24 no período seco. O máximo valor registrado foi 5,19 mS/cm durante o período seco no ponto Q68 na campanha 19, corroborando com o maior valor encontrado para a salinidade nas mesmas condições.

Figura 17 - Variação da condutividade elétrica nos pontos amostrais das bacias hidrográficas GI3, do rio Moxotó, do rio Pajeú e do rio Paraíba, nos períodos chuvosos e secos dos anos de 2014 a 2019



Fonte: A autora (2021).

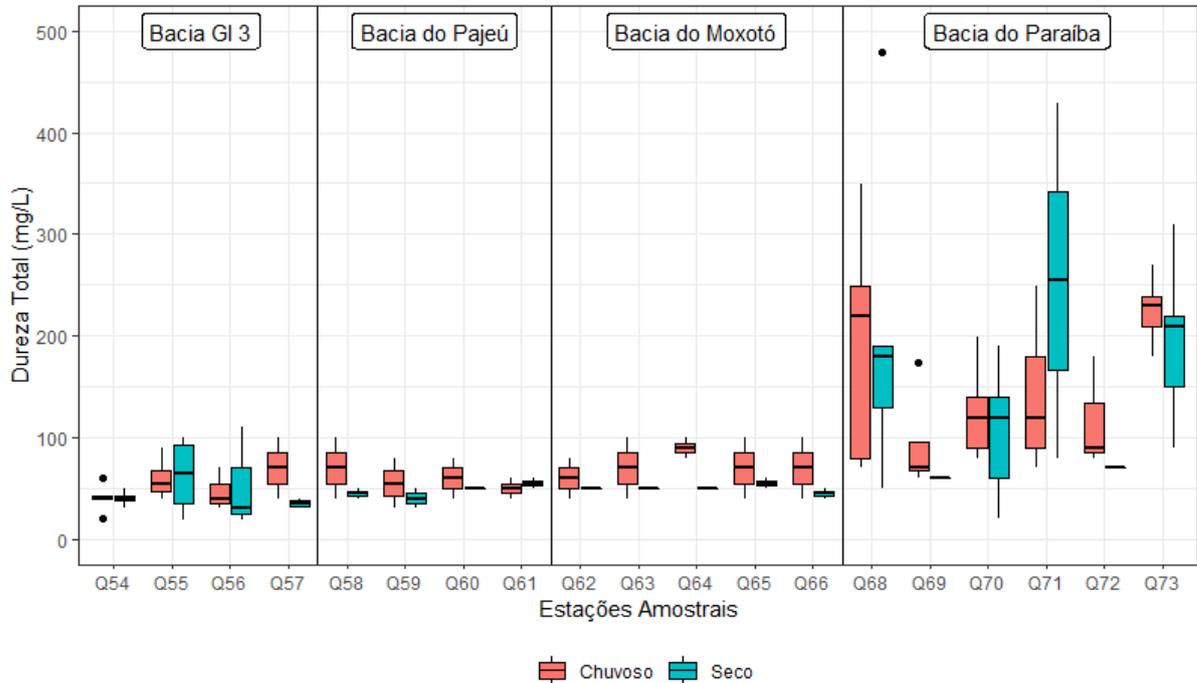
A Resolução CONAMA nº 357/2005 não estabelece um valor máximo permitido para a condutividade, entretanto, de acordo com a CETESB (2019b), níveis acima de 0,1 mS/cm podem ser interpretados como impactados, pois o indicador representa uma medida indireta da concentração de poluentes. Nesse caso, a maioria dos pontos analisados na pesquisa estão com valores acima dessa referência, indicando ambientes impactados por alguma forma de poluição.

Com relação aos resultados da variável dureza total (Figura 18), também foi possível observar que as maiores amplitudes de variação aconteceram na bacia do Paraíba, com os maiores valores ocorrendo no período chuvoso na maioria dos pontos. Nas bacias GI3, do Pajeú e do Moxotó, os valores oscilaram entre 19,36 mg/L e 109,60 mg/L, enquanto foram encontrados na bacia do Paraíba entre 19,93 mg/L e 478,46 mg/L, sendo o maior valor durante o período seco no ponto Q68 na campanha 19. Nessa mesma campanha, o ponto Q71 também apresentou níveis altos de dureza total, alcançando 428,62 mg/L.

Costa et al. (2018) também encontraram valores máximos de dureza durante o período chuvoso, em seu estudo de avaliação da qualidade da água do rio Guaribas, localizado no semiárido piauiense. Os autores encontraram valores altos de dureza, de forma geral, e foram averiguadas variações entre os pontos de coleta, com os valores máximos sendo atribuídos ao aumento da concentração de íons cálcio e magnésio, possivelmente carregados em materiais

lixiviados no leito do rio. Partindo desse princípio, pode-se inferir que condições semelhantes a essas se fazem mais presentes na bacia do Paraíba, afetando seus índices de dureza da água.

Figura 18 - Variação da dureza total nos pontos amostrais das bacias hidrográficas GI3, do rio Moxotó, do rio Pajeú e do rio Paraíba, nos períodos chuvosos e secos dos anos de 2014 a 2019



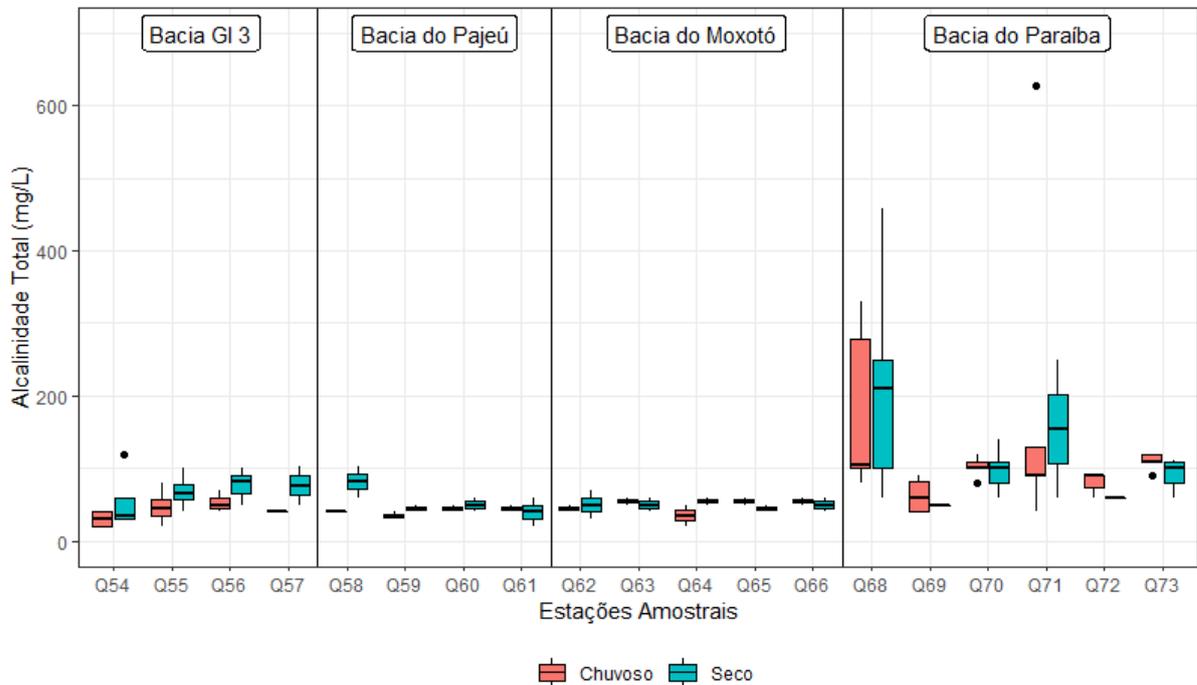
Fonte: A autora (2021).

Nos resultados da variável alcalinidade total, também foram encontradas maiores amplitudes de variação na bacia do Paraíba, especialmente nos pontos Q68 e Q71. Os maiores valores na maioria dos pontos ocorreu durante o período seco. Piratoba et al. (2017) observaram que na interação de fatores como a localização dos pontos de amostragem e a sazonalidade existe evidência significativa para afirmar que estes afetam os teores médios da alcalinidade.

Nas bacias GI3, do Pajeú e do Moxotó, os valores variaram entre 19,84 mg/L de CaCO_3 e 119,60 mg/L de CaCO_3 , ao passo que na bacia do Paraíba foram encontrados entre 39,90 mg/L de CaCO_3 e 628,00 mg/L de CaCO_3 , sendo o maior valor encontrado durante o período chuvoso no ponto Q71 na campanha 20, mostrado como *outlier* na Figura 19. Na campanha 19, o ponto Q68 apresentou o segundo maior nível de alcalinidade total registrado, atingindo 458,52 mg/L de CaCO_3 . Segundo a Secretaria de Vigilância em Saúde (BRASIL, 2006), valores elevados de alcalinidade estão relacionados a processos de decomposição da matéria orgânica e à alta taxa respiratória de microorganismos, com liberação e dissolução do

gás carbônico (CO_2) na água. A instituição ainda afirma que a maioria das águas naturais apresenta valores de alcalinidade na faixa de 30 a 500 mg/L de CaCO_3 .

Figura 19 - Variação da alcalinidade total nos pontos amostrais das bacias hidrográficas GI3, do rio Moxotó, do rio Pajeú e do rio Paraíba, nos períodos chuvosos e secos dos anos de 2014 a 2019

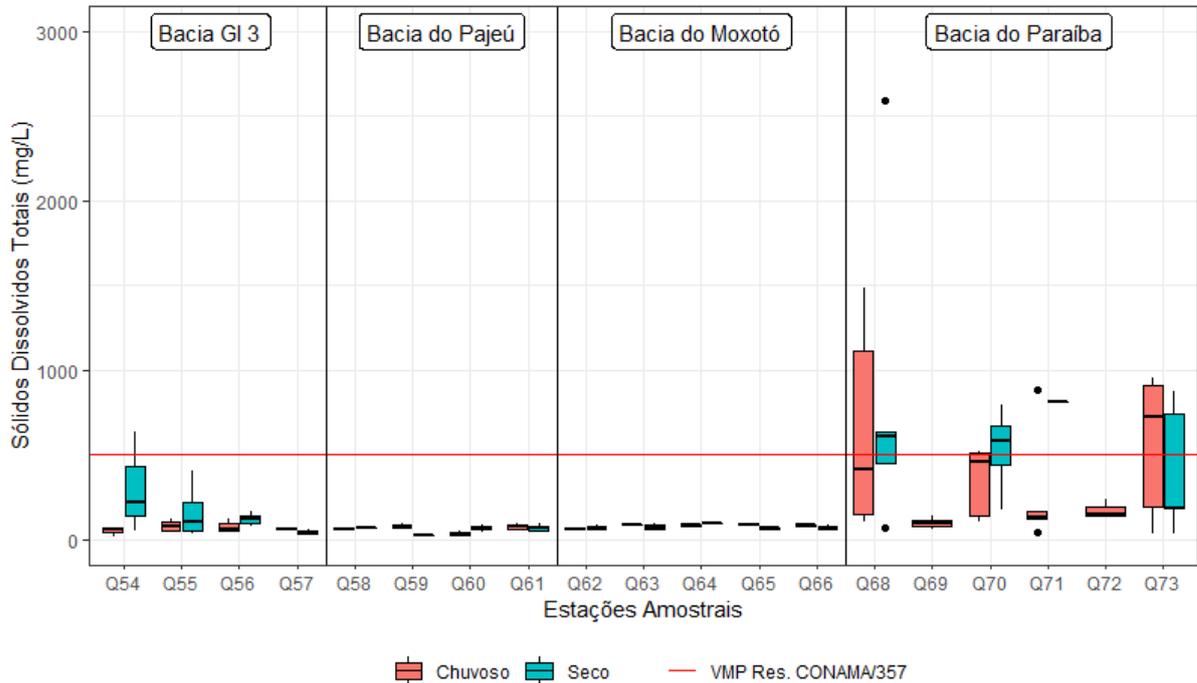


Fonte: A autora (2021).

A Resolução CONAMA nº 357/2005 recomenda para a variável sólidos dissolvidos totais o valor máximo de 500 mg/L para águas doces Classe 2. O ponto Q54 na bacia GI3 e os pontos Q68, Q70, Q71 e Q73 na bacia do Paraíba tiveram resultados que ficaram acima desse limite tanto para o período chuvoso quanto para o seco (Figura 20). No ponto Q54 os resultados oscilaram entre 19 e 639 mg/L, com o maior valor ocorrendo durante a campanha 17 no período seco; enquanto na bacia do Paraíba variaram entre 31 e 2592 mg/L, sendo o resultado máximo registrado durante o período seco no ponto Q68 na campanha 19.

Com relação ao abastecimento público de água, a Portaria de consolidação nº 5/2017 do Ministério da Saúde estabelece um limite de 1.000 mg/L para o padrão de potabilidade referente aos sólidos dissolvidos totais, pois essa parcela reflete a influência de lançamento de efluentes, além de afetar a qualidade organoléptica da água. Piratoba et al. (2017) também registraram os maiores valores encontrados em sua pesquisa durante o período seco.

Figura 20 - Variação dos sólidos dissolvidos totais nos pontos amostrais das bacias hidrográficas GI3, do rio Moxotó, do rio Pajeú e do rio Paraíba, nos períodos chuvosos e secos dos anos de 2014 a 2019



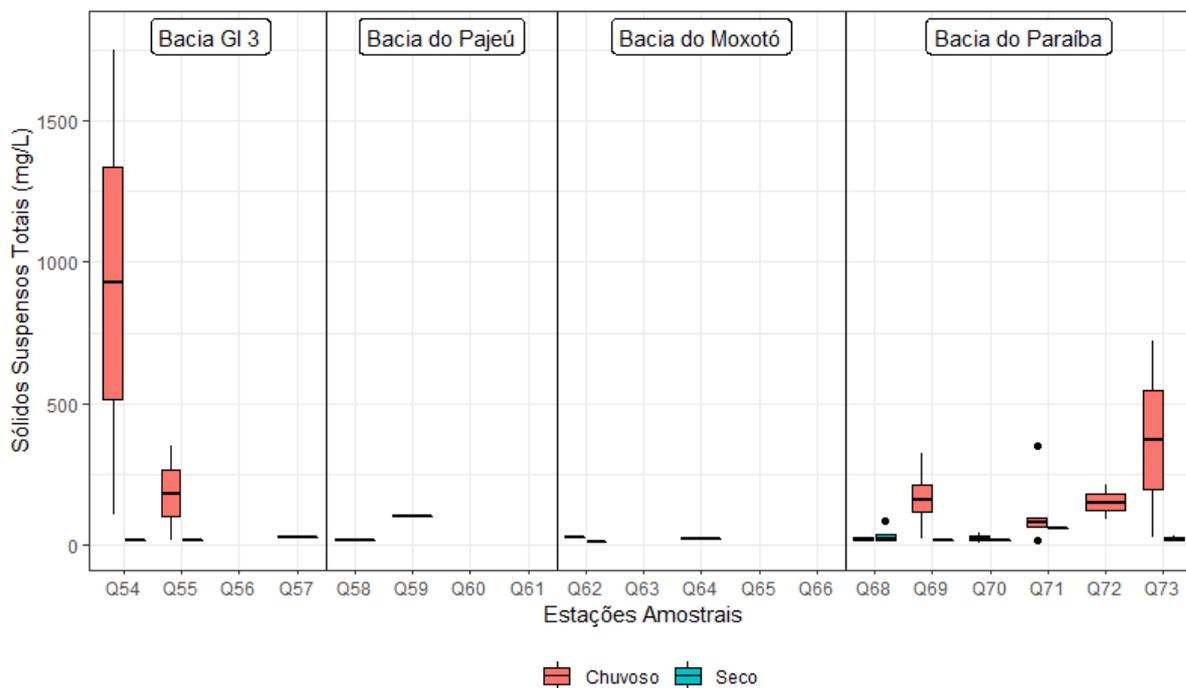
Fonte: A autora (2021).

A concentração de sólidos suspensos totais apresentou variação bastante significativa principalmente nos pontos Q54 e Q73, respectivamente nas bacias GI3 e do Paraíba (Figura 21). Diversos pontos como Q56, Q60, Q61, Q63, Q65 e Q66 apresentaram todas as suas amostras com valores abaixo do limite de quantificação, portanto, não foram considerados na construção dos *boxplots*.

No ponto Q54 os resultados tiveram variação entre 12 mg/L e 1749 mg/L, onde o último foi o maior valor encontrado entre todas as amostras analisadas, ocorrendo durante a campanha 22 no período chuvoso. Os valores na bacia do Paraíba oscilaram entre 10 e 721 mg/L, com o maior resultado entre eles registrado durante o período chuvoso no ponto Q73 na campanha 16.

O valor extremo encontrado no ponto próximo à captação do PISF no reservatório Itaparica (Q54) pode estar relacionado com a redução de volume que o reservatório sofreu ao longo do ano de 2017 (SILVA, 2019). Já no caso dos demais reservatórios que apresentaram baixos índices de sólidos suspensos, uma possível explicação seria o fato de estarem posicionados consecutivamente, onde nesses casos a tendência geral é que a quantidade de material em suspensão seja menor nas vazões liberadas a jusante (LIMA; SEVERI, 2014).

Figura 21 - Variação dos sólidos suspensos totais nos pontos amostrais das bacias hidrográficas GI3, do rio Moxotó, do rio Pajeú e do rio Paraíba, nos períodos chuvosos e secos dos anos de 2014 a 2019

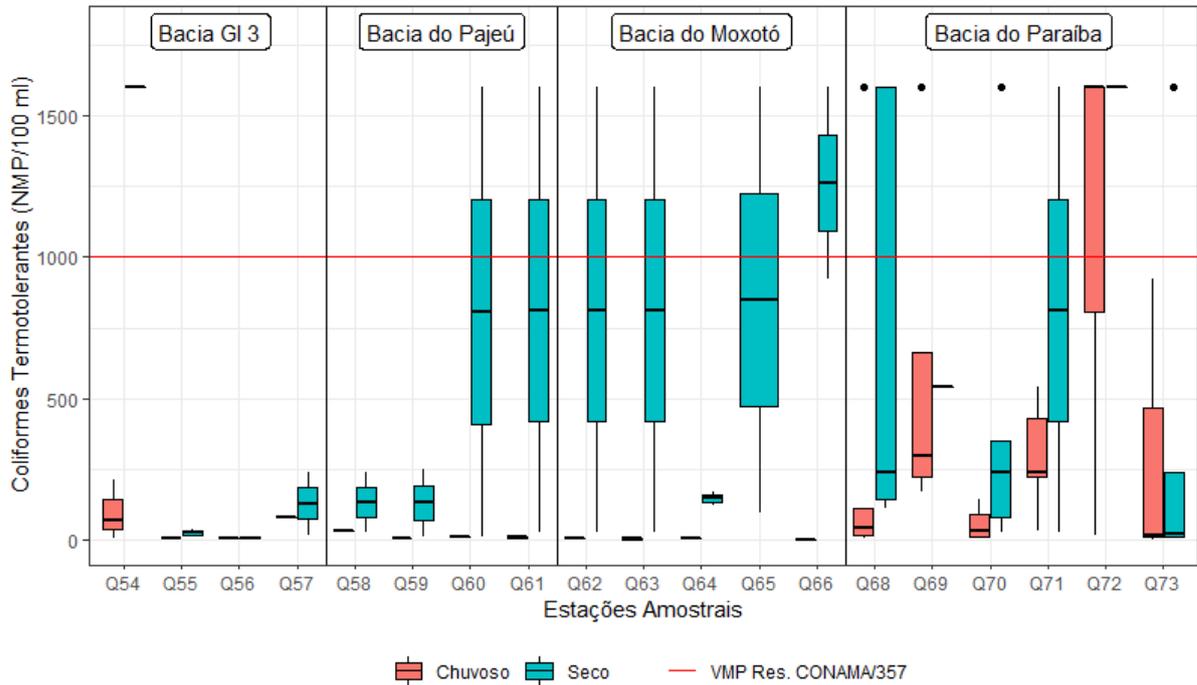


Fonte: A autora (2021).

Amostras com concentração de coliformes termotolerantes acima do valor máximo recomendado pela Resolução CONAMA nº 357/2005 para águas doces Classe 2 (1000 NMP/100 mL) foram identificadas em todas as bacias monitoradas em pelo menos uma campanha, e a maioria durante o período seco (Figura 22). Durante a campanha 24, os pontos Q60, Q61, Q62, Q63, Q68, Q70 e Q73 apresentaram concentrações acima de 1600 NMP/100 ml, assim como o ponto Q54 durante a campanha 21. O ponto Q72, que esteve seco na maioria das campanhas analisadas, exibiu valores semelhantes nas campanhas 18, 23 e 25.

Santos et al. (2013), Silva et al. (2014) e Calado (2020) também determinaram a presença de coliformes termotolerantes em reservatórios localizados na bacia do rio Paraíba, enquanto Melo (2007), Rossiter (2017) e Silva (2019) encontraram coliformes em amostras de água do reservatório Itaparica (onde está localizada a captação do Eixo Leste). Os mesmos autores atribuíram o fato principalmente ao lançamento de efluentes domésticos sem tratamento e aos efeitos da agricultura e criação de animais nos arredores dos reservatórios, agravados pela crise hídrica que afetou os níveis de água na região.

Figura 22 - Variação dos coliformes termotolerantes nos pontos amostrais das bacias hidrográficas GI3, do rio Moxotó, do rio Pajeú e do rio Paraíba, nos períodos chuvosos e secos dos anos de 2014 a 2019

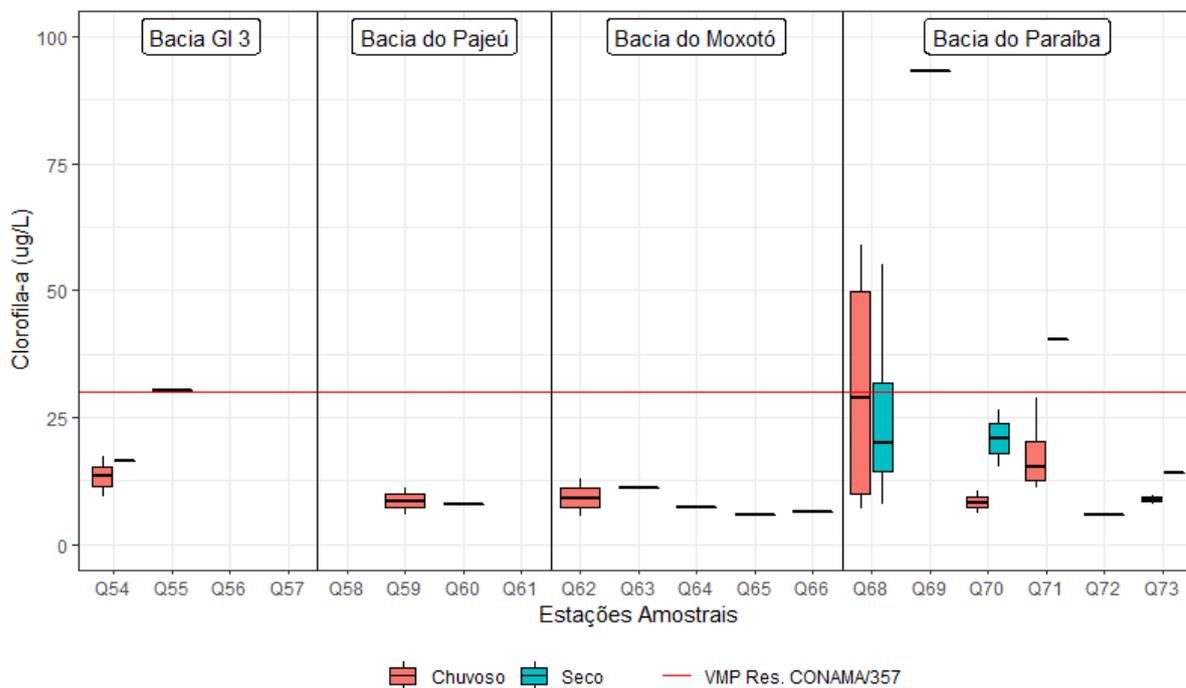


Fonte: A autora (2021).

Em relação à variável clorofila-a, os resultados de mais da metade das amostras se situaram abaixo dos limites de detecção, não sendo consideradas na construção dos *boxplots*. A Resolução CONAMA nº 357/2005 estipula o valor máximo permitido de 30 µg/L para águas doces Classe 2, e a maioria dos pontos onde foi possível obter resultados precisos ficaram abaixo desse limite (Figura 23). As exceções são o ponto Q55, na bacia GI3, e os pontos Q68, Q69 e Q71, na bacia do Paraíba, que oscilaram entre 7 e 691,50 µg/L. O valor máximo ocorreu durante o período seco no ponto Q68 na campanha 19, e está fora dos padrões comumente encontrados nas amostras de qualidade da água.

A clorofila-a é geralmente usada como um indicador de biomassa algal, e o aumento de seus níveis pode estar associado à entrada de nutrientes no corpo hídrico. Lopes et al. (2015) avaliaram o comportamento espacial da clorofila-a no reservatório Itaparica, e obtiveram que cerca de 96% do reservatório encontrava-se abaixo do limiar estabelecido pela resolução CONAMA nº 357/2005, considerando as condições de pesquisa. Os autores também relatam que as maiores concentrações encontradas podem estar associadas ao uso do solo nas margens do corpo hídrico, além do fato de zonas lacustres serem mais suscetíveis a esse aumento.

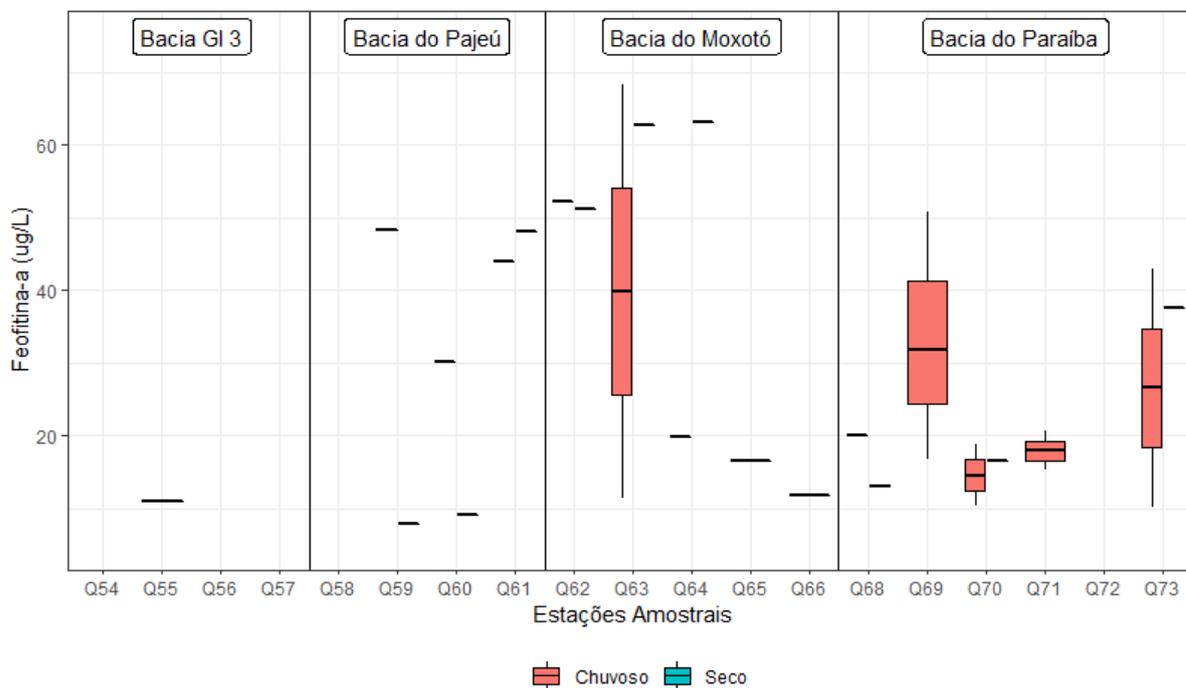
Figura 23 - Variação da clorofila-a nos pontos amostrais das bacias hidrográficas GI3, do rio Moxotó, do rio Pajeú e do rio Paraíba, nos períodos chuvosos e secos dos anos de 2014 a 2019



No tocante à variável feofitina-a, assim como ocorrido com a clorofila-a, grande parte dos resultados das amostras se situaram abaixo dos limites de detecção. A maior amplitude de variação entre os resultados ocorreu no ponto Q63 pertencente à bacia do Moxotó, com mínima de 11,30 µg/L durante a campanha 22, e máxima de 68,41 µg/L durante a campanha 25, ambas no período chuvoso. Na bacia do Paraíba, os valores oscilaram entre 10,20 e 50,70 µg/L, com o maior valor sendo identificado no ponto Q69 durante a campanha 16, também no período chuvoso (Figura 24).

Como mencionado anteriormente, a clorofila-a é um indicador de biomassa do fitoplâncton. Já a feofitina-a representa um produto da degradação da clorofila-a, sendo a sua determinação indispensável na mesma amostra, além de ser um indicador do estado fisiológico do fitoplâncton (CETESB, 2019b). Padial, Pompêo e Moschini-Carlos (2009) encontraram padrões inversos de concentrações entre a clorofila-a e a feofitina-a ao longo da coluna d'água em seu estudo realizado no reservatório Rio das Pedras, em São Paulo.

Figura 24 - Variação da feofitina-a nos pontos amostrais das bacias hidrográficas GI3, do rio Moxotó, do rio Pajeú e do rio Paraíba, nos períodos chuvosos e secos dos anos de 2014 a 2019

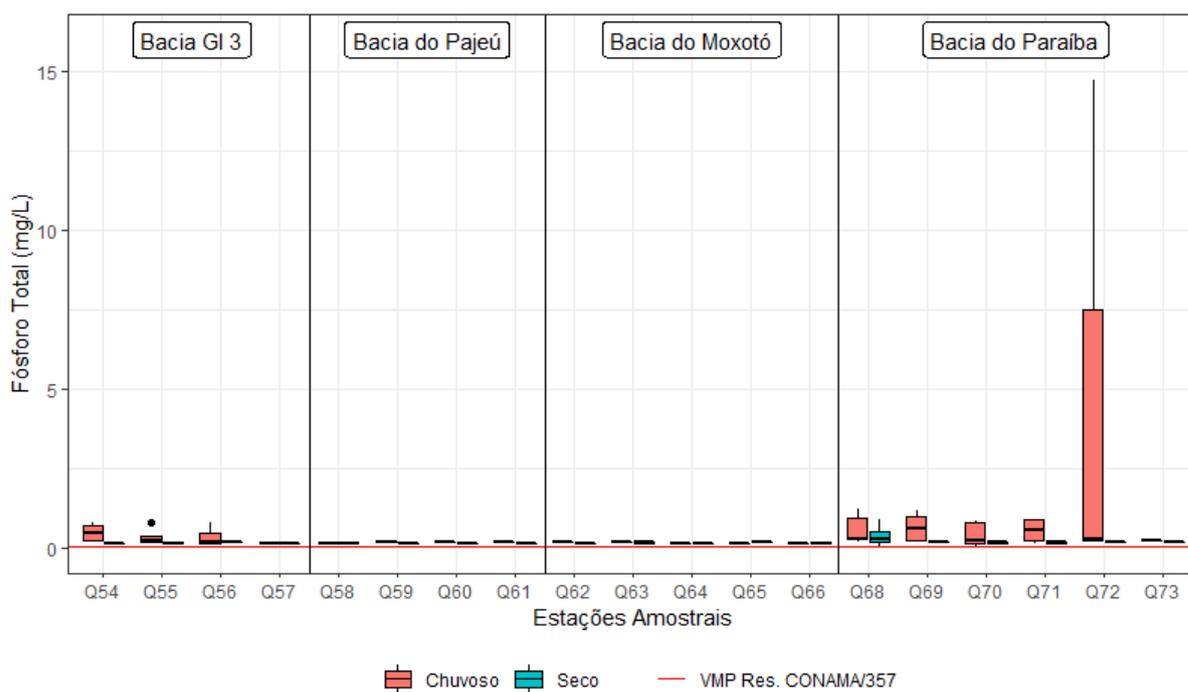


A Resolução CONAMA nº 357/2005 estipula o valor máximo permitido de 0,03 mg/L de fósforo total para águas doces Classe 2. Todas as amostras onde foram obtidos resultados precisos ultrapassaram esse limite (Figura 25), e uma parte das amostras apresentou resultados abaixo do limite de quantificação, principalmente nas campanhas após o início da operação do Eixo Leste. Os maiores valores foram encontrados na bacia do Paraíba, onde os pontos Q71 e Q72 atingiram 16,20 mg/L e 14,70 mg/L, respectivamente, durante a campanha 18 no período chuvoso. Novamente, os relatórios da equipe de coleta das amostras de qualidade da água identificaram condições de ocupação humana, cultura irrigada e a presença de animais de pastagem nas margens desses reservatórios, contribuindo para explicar os altos valores encontrados. Esses valores se mostraram muito acima dos registrados nas demais amostras, que oscilaram entre 0,5 mg/L e 1,20 mg/L.

O alto índice de violação do limite recomendado para a variável fósforo total caracteriza o lançamento de efluentes sanitários não tratados ou de contribuições difusas agrícolas como as principais fontes de poluição que atuam na qualidade das águas das bacias que fazem parte do Eixo Leste do PISF, resultado semelhante ao encontrado em diversos estudos em outras bacias brasileiras (COSTA et al., 2017; CALAZANS et al., 2018; OLIVEIRA et al., 2018; VARGAS et al., 2018).

Silva, Azevedo e Alves (2014) observaram concentrações dessa variável em níveis acima do limite permitido em vários pontos da bacia do rio Paraíba, reportando esses valores ao recebimento constante de cargas orgânicas de efluentes domésticos sem tratamento. Lima e Severi (2014) também encontraram valores altos de fósforo total em amostras de água provenientes do reservatório Itaparica.

Figura 25 - Variação do fósforo total nos pontos amostrais das bacias hidrográficas GI3, do rio Moxotó, do rio Pajeú e do rio Paraíba, nos períodos chuvosos e secos dos anos de 2014 a 2019

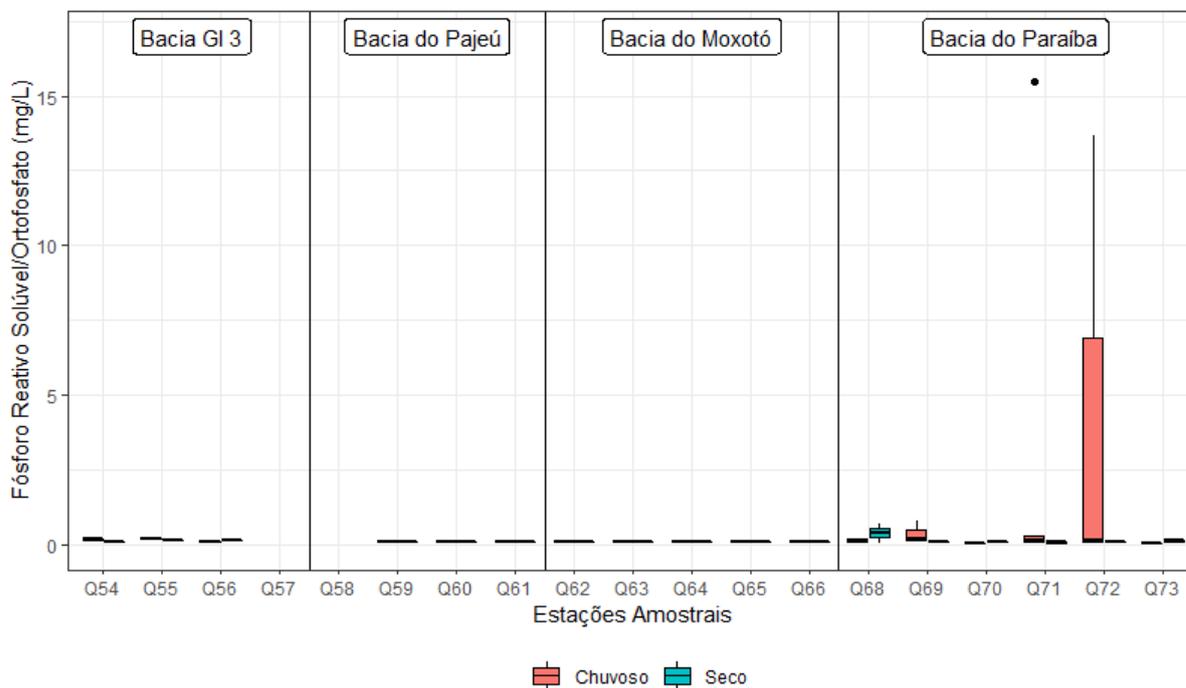


Fonte: A autora (2021).

Os resultados de mais da metade das amostras ficaram abaixo do limite de detecção para a variável fósforo reativo solúvel, e as determinadas obtiveram padrão de comportamento semelhante ao fósforo total (Figura 26). As baixas concentrações no ambiente são acarretadas pelo fato de, em ambientes tropicais, o fósforo reativo solúvel ser prontamente assimilado pelos organismos fotossintetizantes (ESTEVEZ, 2011).

Assim, os maiores valores novamente foram encontrados na bacia do Paraíba durante a campanha 18, com os pontos Q71 e Q72 atingindo máximas de 15,50 e 13,70 mg/L, respectivamente, destoando da variação entre 0,06 e 0,8 mg/L das demais amostras. No estudo de Lima e Severi (2014) a concentração de fósforo solúvel reativo também apresentou variação semelhante à de fósforo total, com baixos valores no reservatório Itaparica.

Figura 26 - Variação do fósforo reativo solúvel nos pontos amostrais das bacias hidrográficas GI3, do rio Moxotó, do rio Pajeú e do rio Paraíba, nos períodos chuvosos e secos dos anos de 2014 a 2019

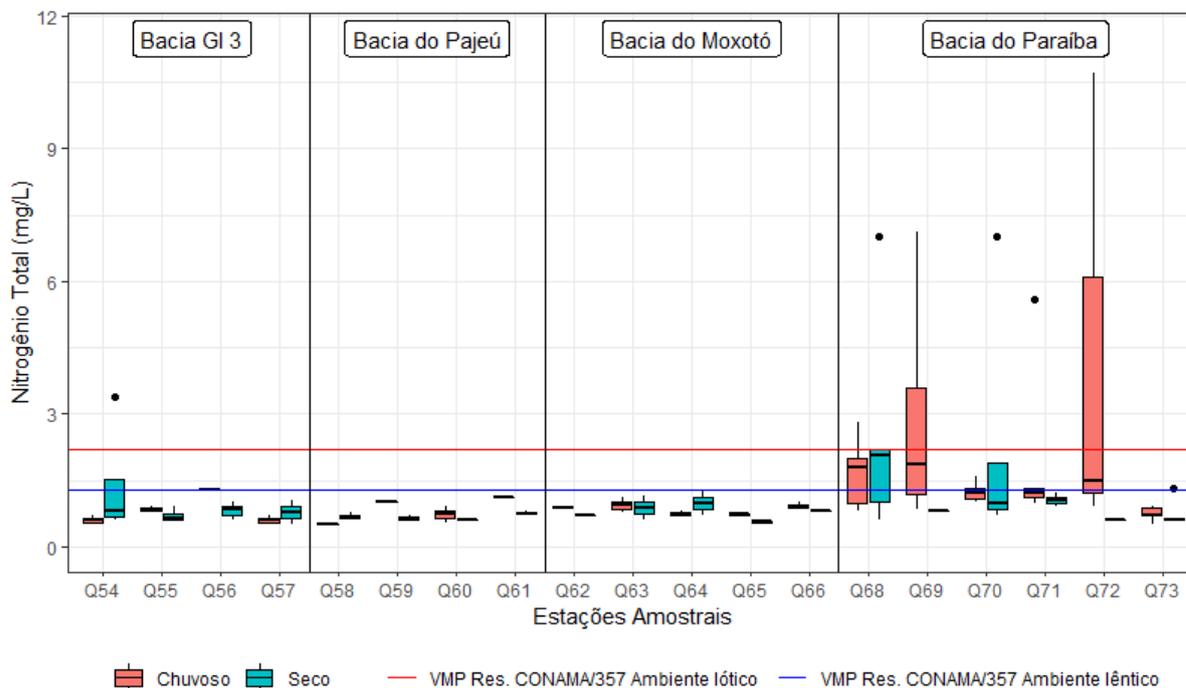


Fonte: A autora (2021).

Os limites recomendados pelo CONAMA para o nitrogênio total são 1,27 mg/L N para ambientes lênticos e 2,18 mg/L N em lóticos. Somente os pontos Q69 e Q71 são ambientes lóticos, e ambos excederam o limite recomendado, atingindo os valores máximos 7,10 e 5,60 mg/L N, respectivamente, durante a campanha 18. Das estações que apresentam ambiente lêntico, apenas Q54 e Q56, na bacia GI3, e todas as demais da bacia do Paraíba ultrapassaram o valor máximo permitido. No ponto Q72 todos os resultados atenderam à legislação, à exceção da campanha 18 no período chuvoso, onde foi registrado um pico de 10,7 mg/L N (Figura 27), associado a valores elevados de outras variáveis, conforme já mencionado anteriormente.

Silva, Casé e Lopes (2019) obtiveram resultados quanto às concentrações de nitrogênio total oscilando entre 0,5 mg/L N no reservatório Itaparica a 30 mg/L N na bacia do rio Paraíba. Mascarenhas et al. (2013) também encontraram valores acima do permitido pelo CONAMA na bacia do Paraíba.

Figura 27 - Variação do nitrogênio total nos pontos amostrais das bacias hidrográficas GI3, do rio Moxotó, do rio Pajeú e do rio Paraíba, nos períodos chuvosos e secos dos anos de 2014 a 2019

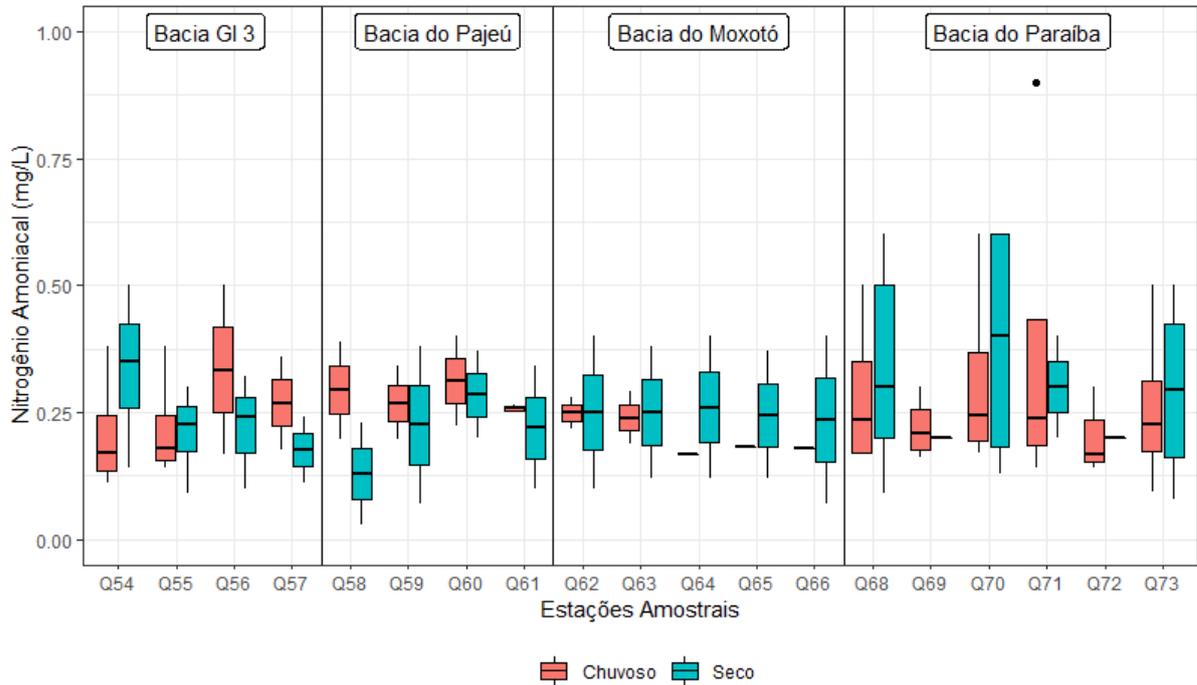


Fonte: A autora (2021).

O CONAMA estabelece diferentes limites máximos para a variável nitrogênio amoniacal, de acordo com o pH da amostra. Dos resultados obtidos, apenas uma amostra (Q70 na campanha 21) excedeu o limite permitido, quando atingiu 0,60 mg/L N para um pH de 8,99 (valor máximo permitido 0,50 mg/L N, para $\text{pH} > 8,50$). Contudo, esse não foi o maior resultado alcançado pelas amostras analisadas. Durante a campanha 20, o ponto Q71 atingiu 0,90 mg/L N para um pH de 7,98, não ultrapassando a resolução do CONAMA que estabelece máximo de 2,00 mg/L N, para $7,50 < \text{pH} \leq 8,00$. As demais amostras variaram entre 0,07 e 0,60 mg/L N (Figura 28).

Rossiter (2017) não encontrou em seu estudo concentrações de nitrogênio amoniacal acima do estabelecido pelo CONAMA no reservatório Itaparica, enquanto Silva (2019) obteve concentrações superiores ao permitido em pontos monitorados nas áreas de pisciculturas no reservatório, o que reforçaram a contribuição da atividade na alteração da qualidade da água e na deposição de nutrientes no sedimento, em adição às outras fontes de poluição como esgotos e perímetros irrigados.

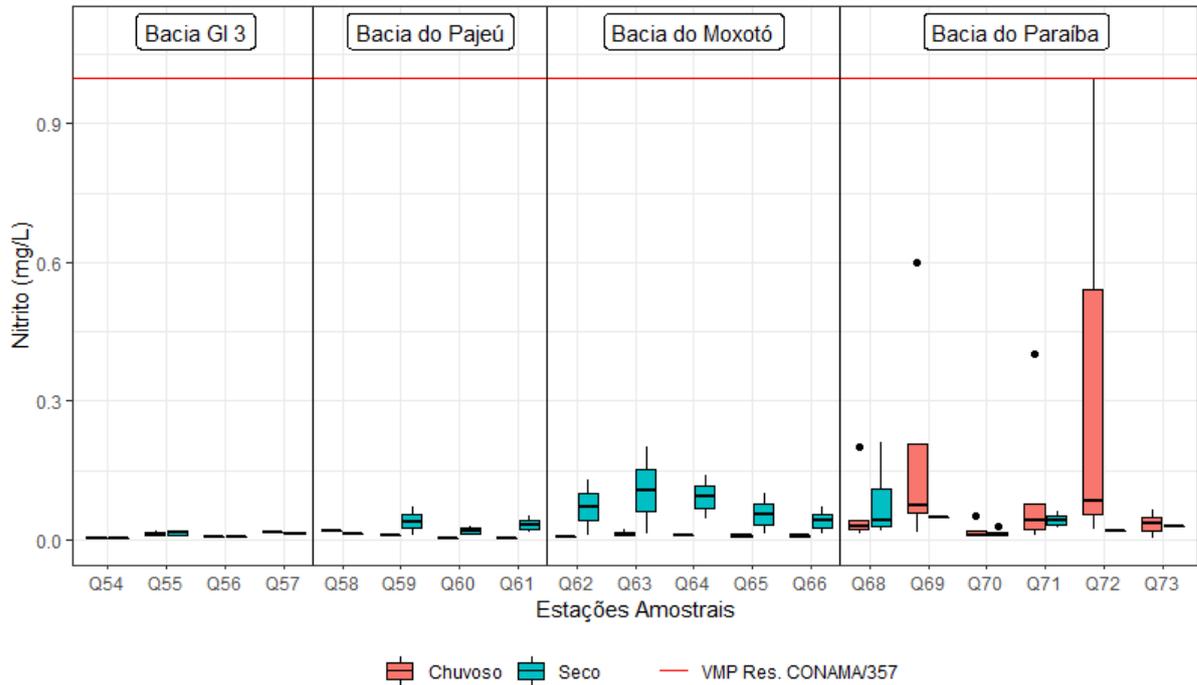
Figura 28 - Variação do nitrogênio amoniacal nos pontos amostrais das bacias hidrográficas GI3, do rio Moxotó, do rio Pajeú e do rio Paraíba, nos períodos chuvosos e secos dos anos de 2014 a 2019



Fonte: A autora (2021).

Em relação à variável nitrito, o CONAMA estabelece para águas doces Classe 2 o valor máximo de 1,00 mg/L N. Uma das amostras analisadas no período estudado, correspondente ao ponto Q72 na campanha 18, apresentou exatamente o valor definido na resolução (Figura 29). Como observado em outras variáveis, a bacia do Paraíba exibiu os maiores valores encontrados, que ocorreram predominantemente no período chuvoso. Nas demais bacias, foram identificadas menores amplitudes de variação, que aconteceram principalmente durante o período seco, oscilando entre os valores 0,02 e 0,20 mg/L N. Rossiter (2017) também não encontrou valores acima do permitido no reservatório Itaparica, porém nesse estudo a variável teve maior variabilidade sazonal, ainda com os maiores valores obtidos durante o período seco.

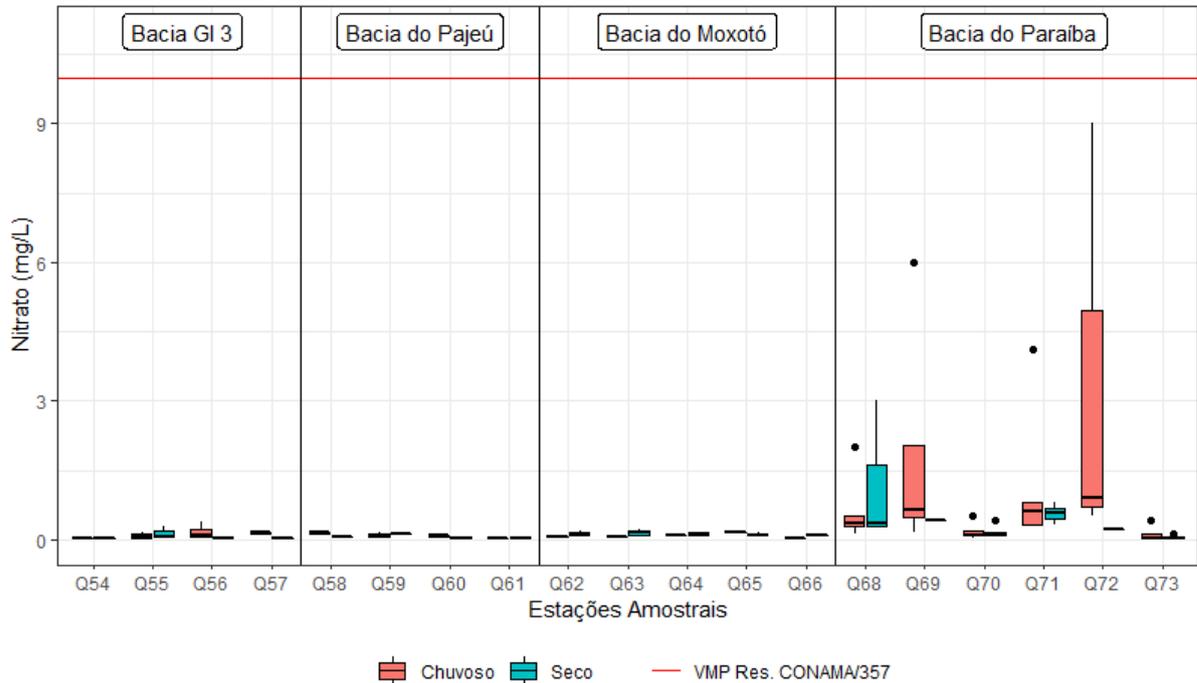
Figura 29 - Variação do nitrito nos pontos amostrais das bacias hidrográficas GI3, do rio Moxotó, do rio Pajeú e do rio Paraíba, nos períodos chuvosos e secos dos anos de 2014 a 2019



Fonte: A autora (2021).

Nenhuma das amostras avaliadas excedeu 10,00 mg/L N, que é o máximo valor permitido pelo CONAMA para a variável nitrato em águas doces Classe 2 (Figura 30). O resultado obtido com valor mais alto foi 9,00 mg/L N, identificado no ponto Q72 durante a campanha 18, semelhante ao ocorrido com o máximo valor para a variável nitrito. Novamente, os dados das amostras da bacia do Paraíba apresentaram maiores amplitudes de variação, e, em contrapartida, as demais bacias exibiram resultados constantes, variando entre 0,02 e 0,38 mg/L N. Farto e Silva (2020) encontraram um comportamento de pequenas variações do nitrato no reservatório Epitácio Pessoa entre fevereiro e outubro de 2017, com leve aumento dos valores a partir do mês de maio. Silva (2019) também não obteve resultados acima do recomendado, em seu estudo no reservatório Itaparica. Os resultados encontrados nesta pesquisa corroboram com a afirmação de Tundisi e Tundisi (2008), que as baixas concentrações de compostos nitrogenados são características de reservatórios tropicais.

Figura 30 - Variação do nitrato nos pontos amostrais das bacias hidrográficas GI3, do rio Moxotó, do rio Pajeú e do rio Paraíba, nos períodos chuvosos e secos dos anos de 2014 a 2019



Fonte: A autora (2021).

De forma geral, ainda é cedo para afirmar que o início da operação do Eixo Leste do PISF modificou profundamente a qualidade da água da bacia do Paraíba de forma positiva ou negativa. Porém, o período anterior à entrada das águas do rio São Francisco apresentou maior frequência de parâmetros acima dos limites indicados pela legislação. Além disso, para variáveis como salinidade, condutividade elétrica e alcalinidade total foi notória a diminuição dos valores encontrados nas campanhas posteriores ao início das atividades do empreendimento em alguns pontos. Ainda, é importante ressaltar que essa mudança não ocorreu de forma homogênea na bacia receptora, que possui ambientes com diferentes dinâmicas (reservatórios e leitos de rio) e interferências de ações antrópicas.

No período analisado, os valores encontrados no estudo da relação entre a variabilidade sazonal e os parâmetros físico-químicos e biológicos permitiram avaliar que: a temperatura da água, o pH, os coliformes termotolerantes e o nitrogênio amoniacal são as variáveis que possuem maior influência na caracterização entre período seco e chuvoso.

4.2 ÍNDICE DE QUALIDADE DA ÁGUA E ÍNDICE DE ESTADO TRÓFICO

Para facilitar a análise dos valores obtidos para o Índice de Qualidade da Água (IQA) e Índice de Estado Trófico (IET), os resultados foram agrupados por bacia hidrográfica, de acordo com a localização de cada estação amostral.

Os cálculos dos IQAs e IETs foram efetuados para todas as estações de monitoramento e campanhas selecionadas para esta pesquisa, excetuando-se nos pontos onde, no momento da coleta, não havia disponibilidade de água ou que os resultados dos parâmetros necessários para os cálculos estavam ausentes, conforme indicado nas tabelas correspondentes a cada bacia analisada.

4.2.1 Bacia GI 3

Os valores de IQA obtidos para os pontos localizados na bacia GI 3 são apresentados na Tabela 6 e classificam as águas nas categorias Ótima e Boa. Dos 24 resultados de IQA obtidos, 58,3% foram classificados como bons e 41,7% como ótimos. Não houve registro de pontos classificados nas demais classes de qualidade. O registro das estações Q55, Q56 e Q57 como pontos secos em algumas das primeiras campanhas avaliadas se deu pelo fato de os referidos reservatórios estarem em fase de construção nesse período, portanto, não recebendo água. Além disso, nas estações Q54 e Q55 a ausência de dados do parâmetro coliformes termotolerantes impossibilitou o cálculo do IQA em determinadas campanhas.

Tabela 6 - Valores do Índice de Qualidade da Água obtidos para as estações localizadas na bacia GI 3

Campanha	Q54	Q55	Q56	Q57
	(Res. Itaparica)	(Res. Areias)	(Res. Braúnas)	(Res. Mandantes)
16 (2014)	59	*	*	*
17 (2014)	78	*	*	*
18 (2015)	**	**	*	*
19 (2015)	**	75	*	*
20 (2016)	57	60	63	*
21 (2016)	56	66	64	*
22 (2017)	76	81	84	83
23 (2017)	77	82	82	64
24 (2018)	**	81	84	80
25 (2019)	77	83	84	70

* Ponto seco

** Ausência de dados

Categoria	Ótima	Boa	Regular	Ruim	Péssima
-----------	-------	-----	---------	------	---------

Fonte: A autora (2021).

O menor valor encontrado para o IQA na bacia GI 3 foi 56, registrado no ponto Q54 (captação do Eixo Leste) na campanha 21, que foi influenciado pela alta concentração de coliformes termotolerantes na amostra (acima de 1600 NMP/100 ml). Apesar de, como visto

anteriormente na análise dos parâmetros físico-químicos, variáveis como fósforo total, DBO e ocasionalmente os coliformes termotolerantes se apresentarem acima dos limites recomendados, os resultados de IQA mostram que os reservatórios da bacia possuem água de qualidade adequada para consumo humano. As demais estações apresentaram características semelhantes às do ponto de captação da água, havendo melhora na categoria do IQA a partir da campanha 22 para a maioria das amostras. Esses resultados são corroborados por Peres (2012), que obteve qualidade boa ou ótima em grande parte das amostras de água do rio São Francisco analisadas em seu estudo.

Os resultados da determinação do IET dos pontos da bacia GI 3 podem ser observados na Tabela 7. Foram obtidos 21 valores do índice, onde verificou-se que 52,4% são classificados como Oligotróficos, 19% como Ultraoligotróficos, 14,3% como Mesotróficos, 9,5% como Eutrófico e 4,8% Hipereutrófico. Nos dados avaliados, não foi encontrado nenhum ponto classificado na categoria Supereutrófico. Durante a campanha 23, só foi possível realizar o cálculo do IET em uma das estações encontradas na bacia GI 3 devido ao parâmetro clorofila-a não ter sido detectado nas demais amostras. Já durante a campanha 24, em todas as estações da bacia, ambos os parâmetros fósforo total e clorofila-a estavam abaixo do limite de detecção. As lacunas registradas como pontos secos, foram explanadas anteriormente no cálculo do IQA das estações da bacia.

Tabela 7 - Valores do Índice de Estado Trófico obtidos para as estações localizadas na bacia GI 3

Campanha	Q54 (Res. Itaparica)	Q55 (Res. Areias)	Q56 (Res. Braúnas)	Q57 (Res. Mandantes)
16 (2014)	53	*	*	*
17 (2014)	48	*	*	*
18 (2015)	50	50	*	*
19 (2015)	60	63	*	*
20 (2016)	68	53	53	*
21 (2016)	49	49	49	*
22 (2017)	49	49	49	49
23 (2017)	48	**	**	**
24 (2018)	**	**	**	**
25 (2019)	25	47	47	48

* Ponto seco

** Ausência de dados

Estado trófico	Ultraoligotrófico	Oligotrófico	Mesotrófico	Eutrófico	Supereutrófico	Hipereutrófico
----------------	-------------------	--------------	-------------	-----------	----------------	----------------

Fonte: A autora (2021).

O único caso em que foi obtido um IET na categoria Hipereutrófico ocorreu no ponto Q54 na campanha 20, onde foi registrada a combinação do maior valor de fósforo total (0,80 mg/L) com o segundo maior valor de clorofila-a (17,30 µg/L), ambos considerando as amostras da bacia GI 3. A existência de condições classificadas nas categorias acima do estado Mesotrófico indicam ambientes em processo de eutrofização a extremamente eutrofizados, o que implica a necessidade de monitoramento sistemático em corpos hídricos que são fonte de água bruta para tratamento e distribuição para o abastecimento público.

4.2.2 Bacia do Rio Pajeú

Os resultados de IQA obtidos para os pontos da bacia do Pajeú são apresentados na Tabela 8 e classificam as águas nas categorias Ótima e Boa. Dos 16 resultados obtidos, 69% foram classificados como bons e 31% como ótimos. Não houve registro de pontos classificados nas demais classes de qualidade. Os reservatórios localizados na bacia do Pajeú só tiveram sua construção finalizada e passaram a receber água a partir da campanha 22, o que explica a menor quantidade de dados em relação ao aspecto temporal visto na seção anterior (bacia GI 3).

Tabela 8 - Valores do Índice de Qualidade da Água obtidos para as estações localizadas na bacia do Rio Pajeú

Campanha	Q58	Q59	Q60	Q61
	(Res. Salgueiro)	(Res. Muquém)	(Res. Cacimba Nova)	(Res. Bagres)
22 (2017)	82	77	84	83
23 (2017)	68	80	82	76
24 (2018)	73	68	67	60
25 (2019)	79	78	78	74

Categoria	Ótima	Boa	Regular	Ruim	Péssima
-----------	-------	-----	---------	------	---------

Fonte: A autora (2021).

No estudo realizado por Silva, Casé e Lopes (2019) em estações localizadas na bacia do Pajeú, os autores encontraram valores de IQA, em sua maioria, inferiores aos determinados nesta pesquisa, classificados entre Ruim e Regular. Essa diferença pode ser atribuída ao fato de os reservatórios deste estudo serem recém construídos, e grande parte do aporte de água armazenada por eles ser proveniente da captação do Eixo Leste do PISF, que, como foi visto, se apresenta nas categorias de qualidade Ótima e Boa. Dessa forma, assume-se que o IQA está seguindo a tendência observada na bacia doadora.

Os resultados do cálculo do IET nos pontos da bacia do Pajeú podem ser observados na Tabela 9. Foram obtidos 13 valores do índice, com 53,8% sendo classificados como Oligotróficos, 38,5% como Ultraoligotróficos e 7,7% como Eutrófico. Nos dados avaliados, não foi encontrado nenhum ponto classificado nas demais categorias. Nos pontos sinalizados com ausência de dados, ambos os parâmetros fósforo total e clorofila-a estavam abaixo do limite de detecção.

Tabela 9 - Valores do Índice de Estado Trófico obtidos para as estações localizadas na bacia do Rio Pajeú

Campanha	Q58	Q59	Q60	Q61
	(Res. Salgueiro)	(Res. Muquém)	(Res. Cacimba Nova)	(Res. Bagres)
22 (2017)	49	61	49	49
23 (2017)	**	48	49	49
24 (2018)	**	48	47	47
25 (2019)	47	26	25	**

** Ausência de dados

Estado trófico	Ultraoligotrófico	Oligotrófico	Mesotrófico	Eutrófico	Supereutrófico	Hipereutrófico
----------------	-------------------	--------------	-------------	-----------	----------------	----------------

Fonte: A autora (2021).

A tendência da semelhança com a qualidade da água da bacia de origem é confirmada também nos dados obtidos para o IET, com exceção do ponto Q59 na campanha 22 que se apresentou como eutrófico. A ocorrência desse ambiente eutrófico de forma isolada, demonstra que ao longo do caminho das águas está havendo alguma contribuição com potencial de alterar os valores dos parâmetros físico-químicos e ocasionar eutrofização nos reservatórios. Em visita realizada à área de estudo em novembro de 2020, foi possível constatar que os reservatórios construídos ao longo do Eixo Leste estão sendo utilizados pela população para lazer, que muitas vezes descarta resíduos nas águas, apesar dos programas de educação ambiental proporcionados pelo PISF.

4.2.3 Bacia do Rio Moxotó

Os resultados de IQA obtidos para os pontos localizados na bacia do Moxotó são apresentados na Tabela 10 e classificam as águas nas categorias Regular, Boa e Ótima. Dos 20 resultados obtidos, 65% foram classificados como bons, 30% como ótimos e 5% como regulares. Não houve registro de pontos classificados nas classes de qualidade Ruim e Péssima. A mesma justificativa para a menor quantidade de campanhas avaliadas para os pontos da bacia do Pajeú é válida também para os pontos da bacia do Moxotó.

Tabela 10 - Valores do Índice de Qualidade da Água obtidos para as estações localizadas na bacia do Rio Moxotó

Campanha	Q62	Q63	Q64	Q65	Q66
	(Res. Copiti)	(Res. Moxotó)	(Res. Barreiros)	(Res. Campos)	(Res. Barro Branco)
22 (2017)	85	85	83	86	87
23 (2017)	71	69	60	61	63
24 (2018)	47	54	66	75	67
25 (2019)	79	81	57	73	71

Categoria	Ótima	Boa	Regular	Ruim	Péssima
-----------	-------	-----	---------	------	---------

Fonte: A autora (2021).

O menor valor obtido dentre os resultados do IQA para a bacia do Moxotó foi 47 (categoria Regular), no ponto Q62 na campanha 24, sendo causado pela alta concentração de coliformes termotolerantes (acima de 1600 NMP/100 ml) e pela alta DBO (21,10 mg/L O₂) encontradas na amostra. Isso demonstra que, apesar de a maioria dos resultados das estações da bacia seguirem semelhantes aos valores dos pontos da bacia de origem da água, já é possível perceber alterações isoladas. No ponto Q63, na mesma campanha, também foram encontrados coliformes termotolerantes acima de 1600 NMP/100 ml, porém o resultado de DBO 12,60 mg/L O₂ permitiu a classificação na categoria de qualidade Boa.

Os valores calculados para o IET nos pontos da bacia do Moxotó podem ser observados na Tabela 11. Foram obtidos 18 valores do índice, com 50% sendo classificados como Oligotróficos, 27,8% como Ultraoligotróficos e 22,2% como Eutrófico. Nos dados avaliados, não foi encontrado nenhum ponto classificado nas demais categorias. Nos pontos sinalizados com ausência de dados, ambos os parâmetros fósforo total e clorofila-a se encontravam abaixo do limite de detecção.

Tabela 11 - Valores do Índice de Estado Trófico obtidos para as estações localizadas na bacia do Rio Moxotó

Campanha	Q62	Q63	Q64	Q65	Q66
	(Res. Copiti)	(Res. Moxotó)	(Res. Barreiros)	(Res. Campos)	(Res. Barro Branco)
22 (2017)	60	49	61	60	60
23 (2017)	48	49	48	49	49
24 (2018)	48	48	47	49	47
25 (2019)	26	26	47	**	**

** Ausência de dados

Estado trófico	Ultraoligotrófico	Oligotrófico	Mesotrófico	Eutrófico	Supereutrófico	Hipereutrófico
----------------	-------------------	--------------	-------------	-----------	----------------	----------------

Fonte: A autora (2021).

Todas as estações da bacia analisadas na campanha 22 apresentaram estado Eutrófico, com exceção da Q63. Além de possíveis contribuições antrópicas para o aumento da carga de nutrientes que propicia a eutrofização nos reservatórios, segundo Mendes et al. (2017), em determinados casos, o respectivo ciclo biogeoquímico, a existência e desenvolvimento de produtores primários como as macrófitas aquáticas, podem conduzir o estado trófico de um corpo hídrico para Eutrófico. Foi observada em visita à área de estudo a existência de macrófitas nas margens de reservatórios ao longo do Eixo Leste, o que pode corroborar esta possibilidade. No caso dos demais valores de IET obtidos, pode-se perceber que as variáveis necessárias para o cálculo do índice ainda permanecem com valores similares aos encontrados na captação.

4.2.3 Bacia do Rio Paraíba

Os valores de IQA obtidos para os pontos da bacia do Rio Paraíba são apresentados na Tabela 12 e classificam as águas da bacia, de maneira geral, nas categorias Regular e Boa. Dos 39 resultados de IQA obtidos, 51,3% foram classificados como bons, 41% como regulares, 5,1% como ruins e 2,6% como ótimos. Não houve registro de pontos classificados na classe de qualidade Péssima. Ao longo do período avaliado, o ponto Q72 se apresentou sem água em seis campanhas, enquanto Q69 se apresentou seco em cinco, e o ponto Q71 em três. Além disso, em todas as estações em algum momento foi identificada a ausência de algum parâmetro que impossibilitou o cálculo do IQA.

Tabela 12 - Valores do Índice de Qualidade da Água obtidos para as estações localizadas na bacia do Rio Paraíba

Campanha	Q68 (Res. Poções)	Q69 (Mont. Camalaú)	Q70 (Res. Camalaú)	Q71 (Rio do Meio)	Q72 (Rem. Epitácio Pessoa)	Q73 (Res. Epitácio Pessoa)
16 (2014)	47	24	45	52	*	69
17 (2014)	**	*	**	*	*	58
18 (2015)	39	**	48	41	**	**
19 (2015)	29	*	63	**	*	68
20 (2016)	45	*	46	46	*	72
21 (2016)	44	*	46	*	*	67
22 (2017)	70	59	73	50	42	45
23 (2017)	66	60	46	60	61	64
24 (2018)	51	*	**	*	*	54
25 (2019)	58	57	56	56	51	83

* Ponto seco

** Ausência de dados

Categoria	Ótima	Boa	Regular	Ruim	Péssima
------------------	-------	-----	---------	------	---------

Fonte: A autora (2021).

O ponto Q68 foi classificado durante a campanha 19 na categoria Ruim, influenciado principalmente pela DBO de 152 mg/L O₂, o valor mais alto obtido para a variável dentre todas as amostras desta pesquisa (já explanado na seção de análise dos parâmetros físico-químicos), além da alta concentração em outros parâmetros. Da mesma forma, o Q69 na campanha 16 também se apresentou na categoria Ruim, influenciado principalmente pelo nível de oxigênio dissolvido abaixo do recomendado (2,69 mg/L O₂), além da alta taxa de coliformes termotolerantes (acima de 1600 NMP/100 ml) e de nutrientes (PT de 1,19 mg/L P e NT de 2,40 mg/L N). Por outro lado, o ponto Q73 na campanha 25 foi o único caso na bacia do Paraíba onde a água foi classificada na categoria Ótima, onde se destacou a baixa concentração de coliformes termotolerantes (1 NMP/100 ml).

Comparando-se o antes e depois do início da pré-operação do Eixo Leste do PISF, percebe-se que nos pontos Q68 e Q70 o IQA passou a se apresentar em melhor categoria de qualidade na campanha 22, e, em contrapartida, no ponto Q73, o índice regrediu. O valor menor encontrado na estação Q73 logo após a entrada das águas do São Francisco na bacia foi influenciado pelas variáveis DBO (72,51 mg/L O₂) e SDT (721 mg/L). Nas campanhas seguintes, o ponto voltou a apresentar bons resultados de IQA. Santos (2017) obteve IQA médio classificado na categoria Regular para amostras do reservatório Epitácio Pessoa nos

anos de 2015 e 2016. Marques et al. (2019) também identificaram IQAs médios categorizados entre qualidade Boa e Regular em seu estudo na bacia do Paraíba.

Os resultados da determinação do IET dos pontos da bacia do Rio Paraíba podem ser observados na Tabela 13. Foram obtidos 42 valores do índice, onde verificou-se que 28,6% são classificados como Oligotróficos, 21% como Eutrófico, 17% como Hipereutrófico, 14,3% como Ultraoligotrófico, 14% como Supereutrófico e 5% como Mesotrófico. Nos pontos sinalizados com ausência de dados, ambos os parâmetros fósforo total e clorofila-a estavam abaixo do limite de detecção ou foi notada ausência de parâmetro que inviabilizou o cálculo do IET. As demais lacunas dos resultados são provenientes dos pontos secos.

Tabela 13 - Valores do Índice de Estado Trófico obtidos para as estações localizadas na bacia do Rio Paraíba

Campanha	Q68 (Res. Poções)	Q69 (Mont. Camalaú)	Q70 (Res. Camalaú)	Q71 (Rio do Meio)	Q72 (Rem. Epitácio Pessoa)	Q73 (Res. Epitácio Pessoa)
16 (2014)	67	80	67	74	*	50
17 (2014)	62	*	63	*	*	50
18 (2015)	50	47	44	78	62	**
19 (2015)	77	*	60	71	*	62
20 (2016)	71	*	66	72	*	57
21 (2016)	66	*	49	*	*	49
22 (2017)	63	50	50	64	62	58
23 (2017)	62	43	49	43	49	49
24 (2018)	60	*	**	*	*	**
25 (2019)	65	42	48	42	49	**

* Ponto seco

** Ausência de dados

Estado trófico	Ultraoligotrófico	Oligotrófico	Mesotrófico	Eutrófico	Supereutrófico	Hipereutrófico
----------------	-------------------	--------------	-------------	-----------	----------------	----------------

Fonte: A autora (2021).

Nas campanhas anteriores à chegada das águas do São Francisco, os baixos volumes dos reservatórios da bacia certamente contribuíram para as condições extremas de estado trófico encontradas em certas campanhas, devido ao aumento da concentração de nutrientes nos corpos hídricos. Eventos como esse foram analisados por Júnior (2009) no reservatório Epitácio Pessoa, onde o autor afirma que o volume de água atuou significativamente como fator diluidor das concentrações de sais e nutrientes em períodos de cheia, e como incremento das concentrações nas épocas de estiagens, durante o período avaliado pelo seu estudo.

Os valores de IET obtidos para a bacia do Paraíba mostram que, a operação do Eixo Leste ajudou a promover a melhora da qualidade da água principalmente nas estações Q69 e Q71, que são as únicas correspondentes a ambientes lóticos nesta pesquisa. A estação que parece ter sido menos beneficiada foi a Q68, correspondente ao reservatório Poções, onde o estado trófico permaneceu característico de ambientes eutrofizados.

A classificação de parte das amostras das bacias envolvidas no Eixo Leste do PISF em relação ao IET indica uma produtividade elevada em relação às condições naturais, com necessidade de medidas para garantir a qualidade da água para abastecimento humano. Os reservatórios na região Nordeste, além das ações antrópicas sofridas, são prejudicados por fatores naturais como as elevadas temperaturas da água durante o ano todo, a grande quantidade de horas de luz recebida por dia, a morfologia dendrítica que facilita a imobilidade da água, o alto tempo de detenção hidráulica, as baixas profundidades e os grandes espelhos de água, que propiciam o aquecimento e a evaporação, bem como a sua natureza alcalina e de alta condutividade (VASCONCELOS et al., 2011). Todos esses fatores contribuem para que, estabelecido o fenômeno da eutrofização, seja estimulada a ocorrência de florações de cianobactérias que produzem cianotoxinas causadoras de alterações no cheiro, cor e sabor das águas, além de terem potencial de afetar a saúde humana e animal.

É importante ressaltar que a qualidade da água obtida pelos resultados do IQA é vantajosa pois facilita a comunicação com o público leigo, mas, ao mesmo tempo, possui a desvantagem de não considerar variáveis importantes para o abastecimento público, como: metais pesados, compostos orgânicos com potencial mutagênico, substâncias que afetam as propriedades organolépticas da água, número de células de cianobactérias e o potencial de formação de trihalometanos (CETESB, 2019a).

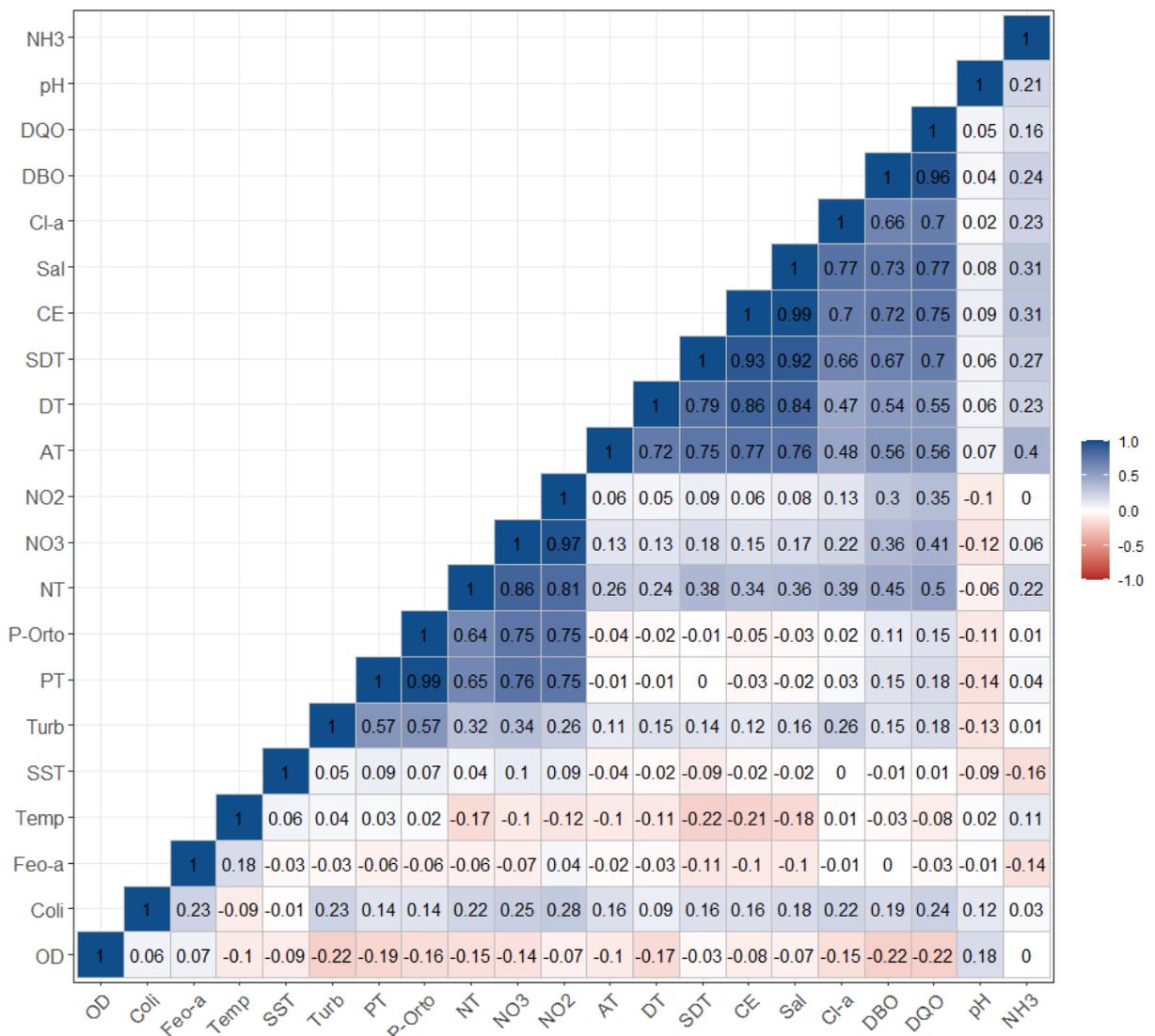
O caso do IET também deve ser considerado, já que utiliza apenas dois parâmetros: fósforo total e clorofila-a. Esteves (2011) pontua que a classificação trófica de um ecossistema aquático deve ser baseada no maior número possível de características, principalmente quando aplicada a regiões tropicais, onde os reservatórios são classificados com base em indicadores normalmente obtidos a partir de amostragens esporádicas.

4.3 ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS

Para reduzir a dimensionalidade dos dados de monitoramento da qualidade da água, a aplicação da Análise de Componentes Principais busca as variáveis-chave que caracterizam ao máximo possível a variação no conjunto de dados, ou seja, com perda mínima de informações.

Como primeira medida, e com fins exploratórios, foi calculada a matriz de correlação de Pearson entre as variáveis, mostrada na Figura 31. O coeficiente de correlação varia entre os valores de -1 (correlação negativa perfeita) a +1 (correlação positiva perfeita), e quanto mais próximo de 1 for o valor absoluto do coeficiente, mais forte será a relação entre as variáveis. Um valor igual 0 indica que não há correlação, ou seja, as variáveis são independentes.

Figura 31 - Matriz de correlação de Pearson das variáveis estudadas



Fonte: A autora (2021).

Adotando significância de 5%, percebeu-se a inexistência de correlações negativas fortes entre as variáveis analisadas. Por outro lado, identificou-se correlação positiva forte entre algumas variáveis formando dois grupos.

No primeiro, PT, P-orto, NT, NO₃ e NO₂ se relacionam entre si, com PT correlacionado a P-orto, NO₃ e NO₂ por meio dos coeficientes 0,99, 0,76 e 0,75, respectivamente. P-orto está relacionado a NO₃ e NO₂ com o mesmo coeficiente 0,75, enquanto NT está relacionado a NO₃ e NO₂ com coeficientes 0,86 e 0,81, respectivamente. Ainda, NO₃ e NO₂ demonstraram alto coeficiente de correlação entre si (0,97). Estas variáveis estão intimamente relacionadas à poluição causada pela matéria orgânica, portanto, as altas correlações são coerentes.

No segundo grupo, as variáveis AT, DT, SDT, CE e Sal se correlacionam entre si, pois são consideradas responsáveis pela mineralização da água. Dentre essas, pode-se destacar os altos coeficientes de correlação de SDT entre CE e Sal, 0,93 e 0,92, respectivamente, além de CE e Sal com coeficiente 0,99. DT também apresentou correlações positivas fortes com CE (0,86) e Sal (0,84).

As variáveis DBO e DQO também apresentaram alta correlação positiva (0,96). Como esperado, o oxigênio dissolvido está negativamente correlacionado com a temperatura devido a que a solubilidade do oxigênio na água diminui com o aumento da temperatura. DBO, DQO e compostos de nitrogênio e fósforo também se apresentaram negativamente correlacionados com o oxigênio dissolvido, uma vez que a matéria orgânica é parcialmente oxidada por oxigênio, enquanto os nutrientes são responsáveis pela eutrofização, causando assim um aumento adicional na concentração de matéria orgânica e, portanto, na demanda de oxigênio (VEGA et al., 1998).

Através da aplicação da Análise de Componentes Principais à matriz de dados, identificou-se que o melhor comportamento das variáveis relacionadas à qualidade da água foi aquele representado pelas cinco componentes iniciais, que retém aqueles componentes que explicam mais de 70% da variabilidade total (JOLLIFFE; CADIMA, 2016). A Tabela 14 mostra que esses grupos, ao todo, explicam 71,80% da variância total dos dados, ou seja, as informações concentradas nessas cinco dimensões representam 71,80% das informações antes diluídas em 21 dimensões (número de variáveis analisadas).

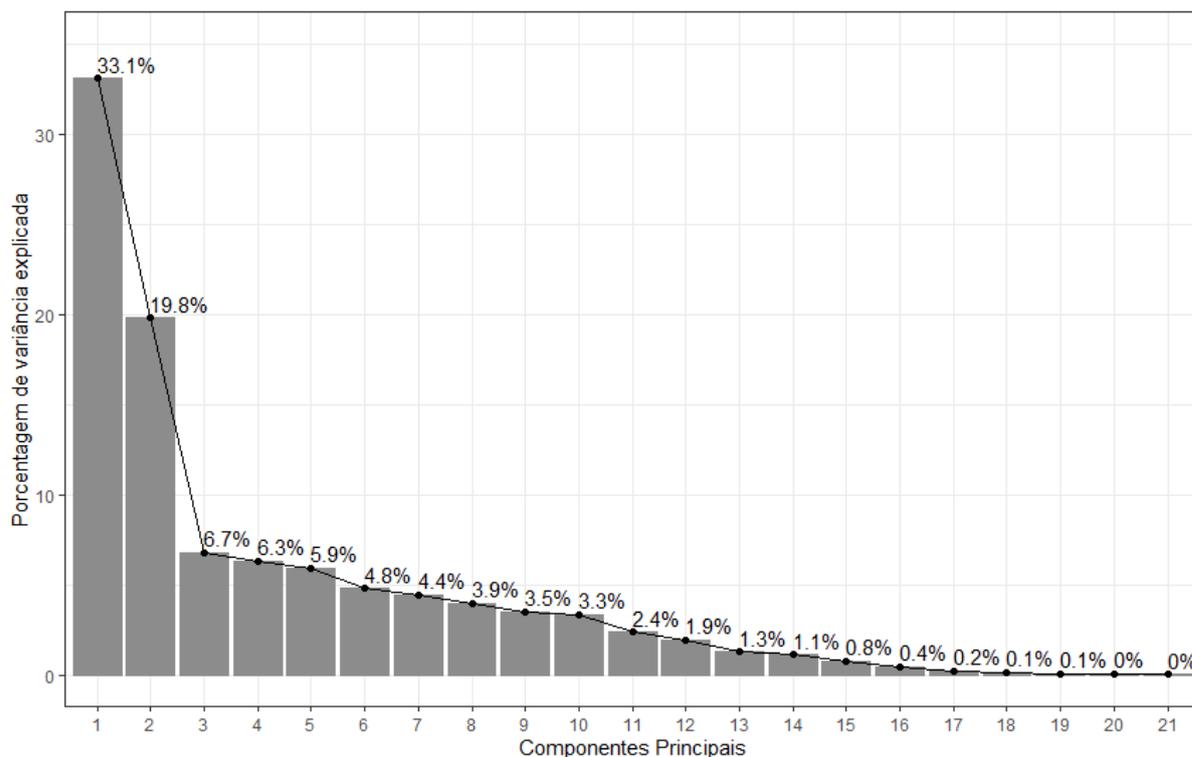
Tabela 14 - Componentes principais, autovalores, porcentagens de variância explicada e acumulada para as amostras avaliadas do monitoramento da qualidade da água do PISF

Componente Principal	Autovalor	Porcentagem de variância explicada	Porcentagem acumulada
PC1	6,94	33,05	33,05
PC2	4,15	19,78	52,83
PC3	1,42	6,75	59,58
PC4	1,32	6,29	65,86
PC5	1,25	5,93	71,80
PC6	1,00	4,78	76,58
PC7	0,93	4,45	81,03
PC8	0,83	3,93	84,95
PC9	0,73	3,46	88,42
PC10	0,69	3,31	91,72
PC11	0,50	2,36	94,08
PC12	0,40	1,90	95,98
PC13	0,27	1,26	97,25
PC14	0,23	1,10	98,35
PC15	0,16	0,77	99,12
PC16	0,09	0,42	99,54
PC17	0,05	0,24	99,77
PC18	0,03	0,12	99,90
PC19	0,01	0,07	99,97
PC20	0,00	0,02	99,99
PC21	0,00	0,01	100,00

Fonte: A autora (2021).

Segundo Gotelli e Ellison (2011), em dados ecológicos típicos, a maioria da variação nos dados é retida pelas primeiras componentes principais, podendo-se desconsiderar as demais que explicam a variação residual. Isso implica que a maior parte da variabilidade das componentes pode ser usada para indicar o processo que afeta a qualidade das águas, sem perda de características significativas. Através do gráfico de sedimentação, que representa cada componente versus suas porcentagens de variância explicada, pode-se observar o ponto onde ocorre a estabilização da variância a partir da terceira componente (Figura 32).

Figura 32 - Gráfico de sedimentação da PCA aplicada às variáveis estudadas



Fonte: A autora (2021).

A matriz das cargas para as cinco primeiras componentes (Tabela 15) apresenta as variáveis ordenadas segundo os valores da componente PC1. As cargas encontradas correspondem ao coeficiente de correlação entre uma variável e sua respectiva componente principal, e deve ser levado em consideração que os valores com maior proximidade a 1 ou -1 são aqueles que possuem maior influência na variabilidade dos dados, sendo então classificados como os mais representativos.

Tabela 15 - Matriz das cargas das variáveis estudadas em relação às cinco primeiras componentes principais encontradas

Variáveis	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
Sal	0,89	-0,4	-0,02	-0,04	-0,04
CE	0,88	-0,41	-0,02	-0,07	-0,06
DQO	0,87	-0,08	-0,06	0,14	-0,1
SDT	0,85	-0,37	0,03	-0,11	-0,07
DBO	0,83	-0,12	-0,08	0,15	-0,02
Cl-a	0,75	-0,21	-0,10	0,2	0,01
DT	0,75	-0,36	-0,11	-0,04	-0,01
AT	0,73	-0,35	0,02	-0,03	0,1
NT	0,67	0,57	0,15	-0,12	-0,03
NO ₃	0,54	0,76	0,12	-0,08	-0,08

Variáveis	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
NO ₂	0,45	0,79	0,22	-0,02	-0,14
Turb	0,34	0,44	-0,26	0,16	0,18
PT	0,34	0,87	-0,04	-0,06	0,16
NH ₃	0,33	-0,16	0,23	-0,18	0,68
P-Orto	0,32	0,87	-0,02	-0,06	0,16
Coli	0,29	0,15	0,43	0,49	-0,17
pH	0,03	-0,22	0,54	0,04	0,36
SST	0	0,15	-0,37	0,1	-0,28
Feo-a	-0,08	0,01	0,19	0,78	-0,16
Temp	-0,16	0,03	-0,28	0,52	0,59
OD	-0,2	-0,15	0,66	-0,08	-0,14
Autovalor	6,94	4,15	1,42	1,32	1,25
% de variância explicada	33,05	19,78	6,75	6,29	5,93
% de variância acumulada	33,05	52,83	59,58	68,86	71,80

*Os valores mais significativos estão em negrito

Fonte: A autora (2021).

A PC1 explica 33,05% da variância dos dados, e se encontra com alta correlação positiva com as variáveis Sal (0,89), CE (0,88), DQO (0,87), SDT (0,85), DBO (0,83), Cl-a (0,75), DT (0,75), AT (0,73) e NT (0,67). Essas variáveis demonstraram estar significativamente correlacionadas entre si na Matriz de Correlação de Pearson (Figura 31). A PC2 explica 19,78% da variância e inclui NO₃ (0,76), NO₂ (0,79), PT (0,87) e P-orto (0,87) com alta correlação positiva. A PC3 (6,75% da variância) possui contribuição positiva significativa do pH (0,54) e OD (0,66), enquanto a PC4 (6,29% da variância) apenas da Feo-a (0,78). Finalmente, a PC5 explica 5,93% da variabilidade dos dados originais, e possui participação significativa das variáveis NH₃ (0,68) e Temp (0,59).

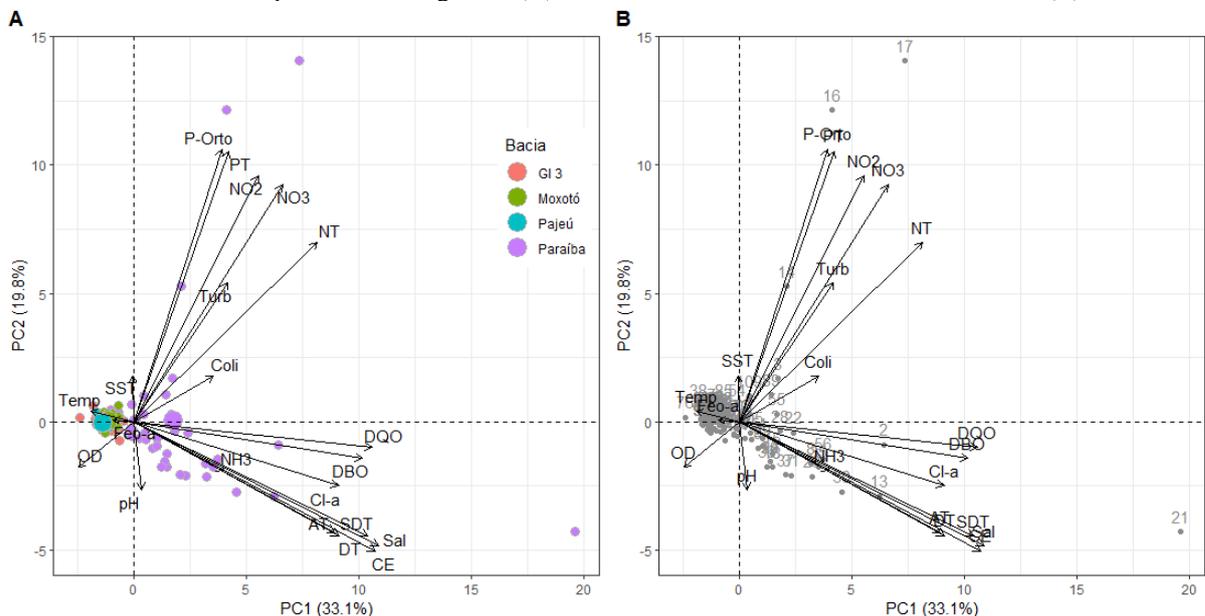
Como pode ser visto na Tabela 15, a PC1 possui alta participação de variáveis de origem mineralógica. Além disso, variáveis relacionadas com poluição antropogênica como DBO, DQO, Cl-a e compostos de fósforo e nitrogênio têm alta contribuição em ambas PC1 e PC2. Resultados semelhantes foram observados por Ferreira (2016), que realizou análise integrada da qualidade de água dos corpos hídricos do PISF, incluindo tanto o Eixo Leste quanto o Eixo Norte. No estudo de Silva, Casé e Lopes (2019) em bacias hidrográficas do Nordeste brasileiro, as variáveis mais representativas foram nitrogênio total, clorofila-a, DBO e resíduo total, às quais os autores associaram às práticas socioespaciais e atividades produtivas existentes no entorno de cada estação amostral. Bertossi et al. (2013) também obtiveram variáveis relacionadas aos sais dissolvidos na água como representativas na

primeira componente principal do seu estudo em sub-bacia hidrográfica rural no sul do estado do Espírito Santo.

Para visualizar simultaneamente as unidades de estudo (por exemplo, estação Q54 na campanha 16) e as variáveis de qualidade da água no espaço das componentes principais PC1 e PC2, foram gerados dois gráficos *biplot* (Figura 33). A posição de cada unidade de estudo no espaço de componentes principais é dada por suas coordenadas, denominadas scores, e estão demonstradas nos gráficos da seguinte forma: A) de acordo com bacia hidrográfica onde estão localizadas, e B) enumeradas com etiquetas de acordo com a ordem do dado na matriz do banco de dados. As flechas correspondem às variáveis (representadas como vetores).

Palacio *et al.* (2020) atribuem as seguintes regras para interpretação do *biplot*: (1) as unidades de estudo que são próximas no espaço, têm características similares nas suas variáveis; (2) o cosseno do ângulo entre dois vetores corresponde a sua correlação; (3) o cosseno do ângulo entre um vetor e uma componente principal corresponde a sua correlação; (4) uma unidade de estudo na direção e sentido de uma variável e afastada do centro de origem tem um valor alto para essa variável.

Figura 33 - *Biplot* das PC1 e PC2 correspondente aos dados de qualidade da água do PISF com unidades classificadas por bacia hidrográfica (A) e de acordo com a ordem na matriz de dados (B)



Fonte: A autora (2021).

Dessa forma, interpretando a relação entre as variáveis e as unidades de estudo de forma conjunta, percebe-se que as amostras coletadas nas bacias GI3, Moxotó e Pajeú apresentam similaridade nos valores de suas variáveis (Figura 33, A), indicando a não

ocorrência de grandes alterações na qualidade da água proveniente da bacia do São Francisco ao longo do percurso do Eixo Leste.

Por outro lado, as águas na bacia do Paraíba apresentam maiores diferenciações entre si e em relação às outras bacias, com unidades de estudo afastadas do centro de origem e localizadas na direção e sentido de variáveis relacionadas à poluição. Isso ocorre com a unidade posicionada na extrema direita (etiqueta 21 na Figura 33, B), correspondente ao ponto Q68 (Açude Poções) durante a campanha 19, que apresentou os maiores valores de DBO, SDT, Cl-a, CE, DQO, DT e Sal dentre todos os pontos e campanhas analisados. As duas unidades situadas de forma isolada na parte superior do gráfico (etiquetas 16 e 17), correspondentes aos pontos Q71 e Q72 da campanha 18, apresentaram os maiores valores registrados para PT e P-orto, além de altos valores de NO₃, NO₂ e NT.

4.4 ANÁLISE DE AGRUPAMENTOS

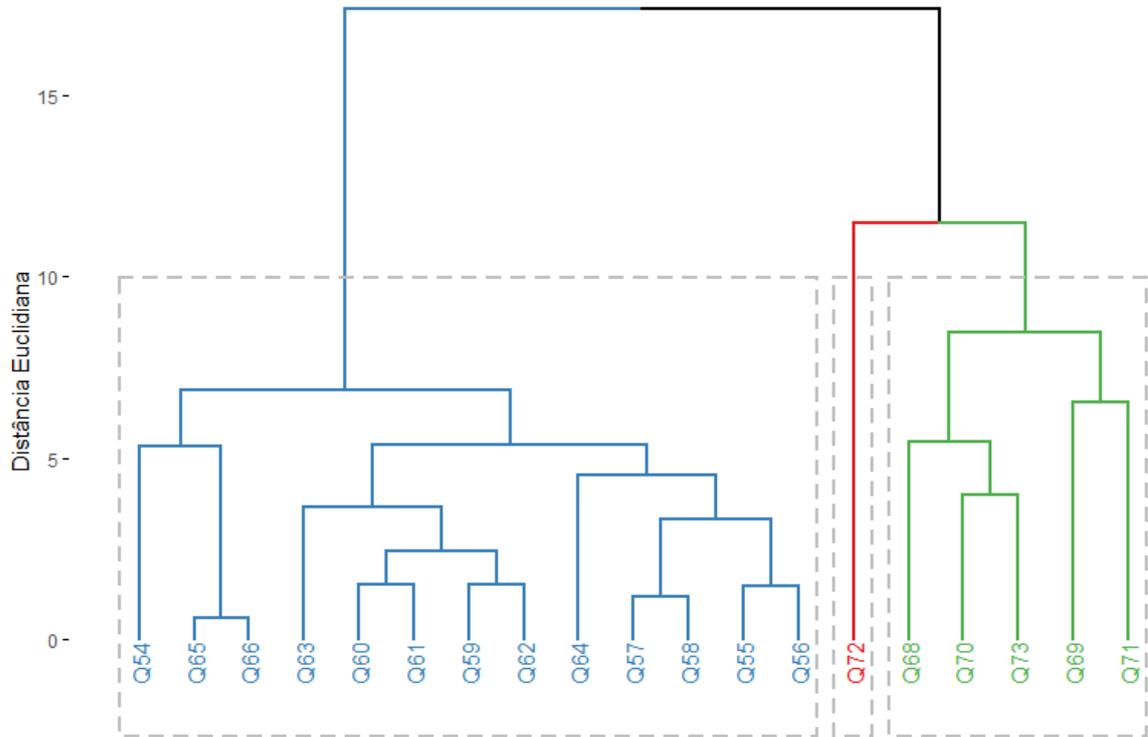
A Análise de Agrupamentos buscou identificar quais pontos tinham características semelhantes de qualidade da água durante o período monitorado. Grupos foram formados a partir dos valores médios das variáveis, diferenciados entre os períodos das estações chuvosa e seca. A técnica foi aplicada aos dados normalizados utilizando a distância euclidiana quadrada como medida de similaridade e o método de Ward na formação dos grupos. Os dendrogramas obtidos através da metodologia aplicada aos dados são mostrados nas Figuras 34 e 35, respectivamente. Foi empregado o conhecimento prático dos dados para determinar os agrupamentos finais que fazem mais sentido para esta aplicação, estabelecendo o ponto de corte nos dendrogramas.

Para as amostras do período chuvoso (Figura 34), três grupos distintos são identificados. O Grupo 1 é formado pelos pontos Q54 a Q66, correspondentes aos reservatórios projetados do Eixo Leste e o ponto de captação no reservatório Itaparica. O Grupo 2 é formado apenas pelo ponto Q72, enquanto o Grupo 3 corresponde aos pontos Q68, Q69, Q70, Q71 e Q73; ambos os grupos compostos pelos pontos localizados na bacia do Paraíba.

O resultado coincide com o obtido na Análise de Componentes Principais, com os pontos do Grupo 1 pertencendo às amostras coletadas nas bacias GI3, Moxotó e Pajeú. O destaque fica no ponto Q72, que apresentou as médias mais altas para as variáveis DBO, PT, NT, Coli, DQO, P-orto, NO₂ e NO₃ durante o período chuvoso, se diferenciando assim das

demais amostras da bacia do Paraíba, que possuem médias mais altas em variáveis relacionadas à poluição que as demais bacias analisadas.

Figura 34 - Dendrograma resultante da Análise de Agrupamentos aplicada aos dados de qualidade da água do PISF no período chuvoso

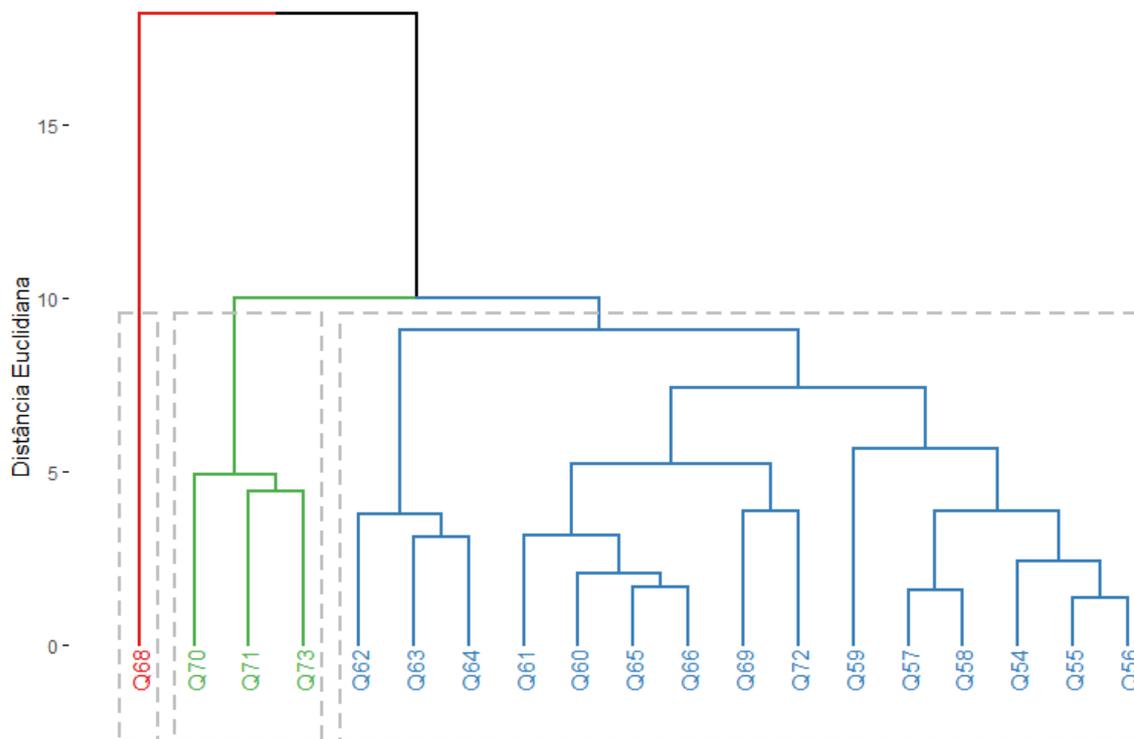


Fonte: A autora (2021).

Em relação ao período seco, o dendrograma (Figura 35) apresenta uma configuração diferente na formação dos grupos identificados. O Grupo 1 é formado apenas pelo ponto Q68, e o Grupo 2 pelos pontos Q70, Q71 e Q73. Nota-se a presença dos pontos Q69 e Q72, pertencentes à bacia do Paraíba, no Grupo 3 junto com os pontos Q54 a Q66, indicando similaridade entre as variáveis das amostras.

O destaque do ponto Q68 também corrobora com o resultado da Análise de Componentes Principais, onde o ponto apresentou valores extremamente altos em diversas variáveis, que ocorreram principalmente no período seco. Os pontos Q69 e Q72 apresentarem similaridade com os não pertencentes à bacia do Paraíba durante o período seco pode ser explicado pelo fato de que esses pontos se apresentaram sem água em seis das dez campanhas avaliadas, e nas que foram possíveis a coleta de amostras, essas exibiram parâmetros que as classificaram com qualidade Boa ou Regular para o Índice de Qualidade da Água (Tabela 12).

Figura 35 - Dendrograma resultante da Análise de Agrupamentos aplicada aos dados de qualidade da água do PISF no período seco



Fonte: A autora (2021).

Em redes de monitoramento que possuem pontos localizados geograficamente próximos, algumas estações podem apresentar qualidade da água similar. A aplicação da Análise de Agrupamentos pode ser uma ferramenta útil na decisão sobre a manutenção de determinada estação e melhor alocação de recursos. Calazans et al. (2018) sugeriram a avaliação da necessidade de interrupção, temporária ou permanente, de algumas estações amostrais que resultaram alocadas em mesmo grupo em seu estudo. Os autores argumentaram que os grupos possuíam grande número de locais de monitoramento em que a qualidade da água se mostrava semelhante, e apresentavam a melhor qualidade da água na bacia, e, portanto, os recursos despendidos nas estações ‘excedentes’ poderiam ser realocados para regiões em que a qualidade da água seria mais degradada.

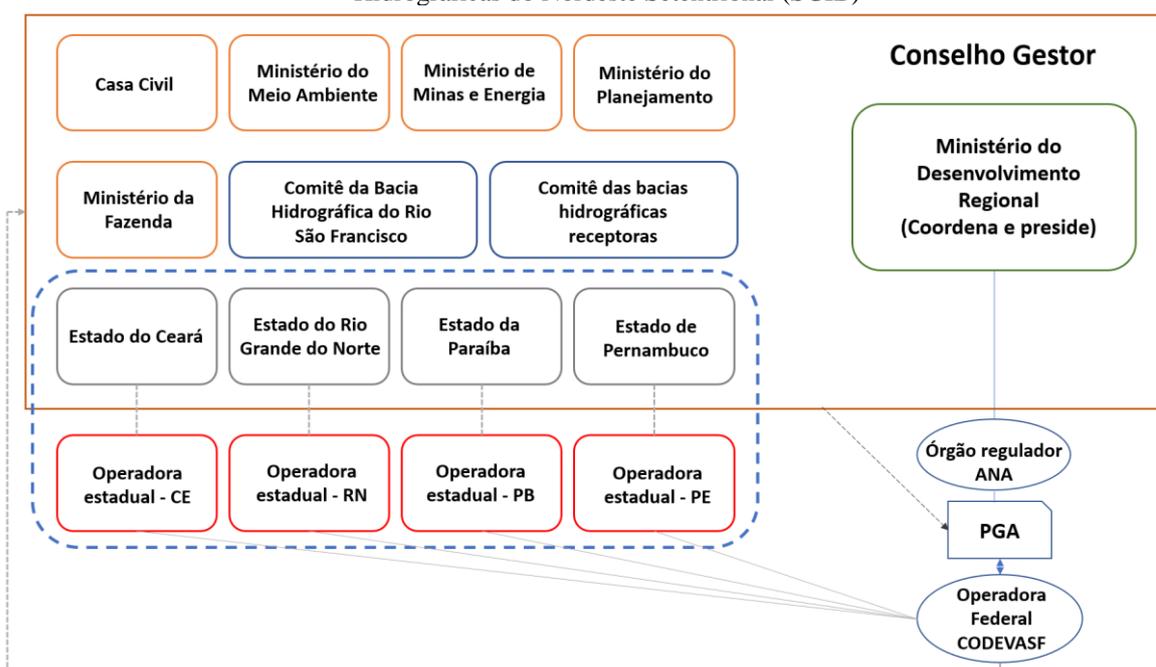
No caso da rede de monitoramento do Eixo Leste do PISF, as estações localizadas nos reservatórios recém construídos se apresentaram em grupos de qualidade da água similar tanto no período seco, quanto no chuvoso, porém, em corpos de água diferentes, inviabilizando a interrupção das coletas nesses pontos.

4.5 ANÁLISE DA GESTÃO AMBIENTAL E DE RECURSOS HÍDRICOS NO EIXO LESTE

O PISF, em toda a sua dimensão, é um projeto de alta complexidade e que ainda carece de referências nacionais para avaliação da sua eficiência. São muitos os desafios para a gestão e manutenção de sua sustentabilidade como empreendimento que objetiva um aumento na segurança hídrica da região Semiárida.

No que diz respeito ao sistema de gestão, do ponto de vista institucional (Figura 36), foi instituído pelo Decreto nº 5995/2006 o Sistema de Gestão do PISF (SGIB), formado pelo atual Ministério do Desenvolvimento Regional, como órgão coordenador; a atual Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, como entidade reguladora; um Conselho Gestor; a Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba (CODEVASF), como Operadora Federal; e pelas Operadoras Estaduais.

Figura 36 - Estrutura do Sistema de Gestão do Projeto de Integração do Rio São Francisco com as Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional (SGIB)



Fonte: Adaptado de BRASIL (2006).

O Conselho Gestor atua por meio da Operadora Federal no estabelecimento de diretrizes para a elaboração do Plano de Gestão Anual do PISF - PGA, que é um planejamento físico-financeiro anual que indica os montantes de água a ser transferida pelo PISF e os respectivos preços de operação. O PGA é aprovado pela ANA a partir dos pedidos que são encaminhados pelos estados através dos Planos Operativos Anuais - POA. A cada ano os

estados apresentam sua demanda de água e a ANA aprova o conjunto dessas demandas no PGA, que vigora para o ano seguinte.

Outros instrumentos da gestão ambiental e de recursos hídricos aplicados ao Eixo Leste do PISF são analisados a seguir.

4.5.1 Licenças ambientais

As resoluções CONAMA nº 01/1986 e nº 237/1997 dispõe sobre avaliação de impactos ambientais e licenciamento ambiental, incluindo a transposição de bacias hidrográficas no conjunto de atividades modificadoras do meio ambiente que estão passíveis de licenciamento ambiental. No caso do PISF, por ser uma obra federal que envolve vários estados, o licenciamento é de responsabilidade do IBAMA.

Dessa forma, a construção dos reservatórios e estruturas que formam o PISF está contemplada na Licença Prévia nº 200/2005 (Anexo B), expedida pelo IBAMA, para os sistemas independentes Eixo Norte e Eixo Leste em toda a sua infraestrutura, contando com condicionantes específicas que tratam de temas como outorga de direito de uso dos recursos hídricos, certificado de avaliação da sustentabilidade da obra e considerações sobre programas ambientais.

Atualmente o Eixo Leste encontra-se sob a Licença de Operação nº1464/2018 (Anexo C), válida por dez anos a partir da data de assinatura, e observadas as condições especificadas no documento. A licença especifica a execução de 29 planos e programas ambientais e sociais, dentre eles o Programa de Monitoramento da Qualidade da Água e Limnologia - PBA 22, que é a fonte da série de dados utilizada nesta pesquisa.

Como relatado anteriormente na seção da metodologia, o PBA 22 é realizado pelo Ministério do Desenvolvimento Regional em parceria com a Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, através do Grupo de Gestão Ambiental - GGA, pertencente ao Departamento de Engenharia Civil. Além do PBA 22, o GGA ainda é responsável pela coordenação do Programa de Monitoramento de Vetores e Hospedeiros de Doenças - PBA 20 e do Programa de Cadastramento de Fontes Hídricas Subterrâneas - PBA 26, também previstos na licença de operação. O grupo ainda coordena o Programa de Monitoramento de Qualidade de Água e Limnologia - PBA 16 e o Programa de Monitoramento de Vetores e Hospedeiros de Doenças - PBA 13 do Ramal do Agreste - Trecho VII.

4.5.2 Outorgas de uso da água

A resolução nº 411/2005 da ANA outorgou ao, na época, Ministério da Integração Nacional o direito de uso de recursos hídricos do rio São Francisco por vinte anos, para a execução do PISF. Nela foi estabelecida uma vazão firme disponível para bombeamento, nos dois eixos, a qualquer tempo, de 26,4 m³/s, correspondente à demanda projetada para o ano de 2025 para consumo humano e dessedentação animal. A vazão firme é a vazão máxima que pode ser retirada de um reservatório ao longo de um período, sem que aconteça falha no abastecimento ou o esvaziamento do reservatório (AQUINO, 2019).

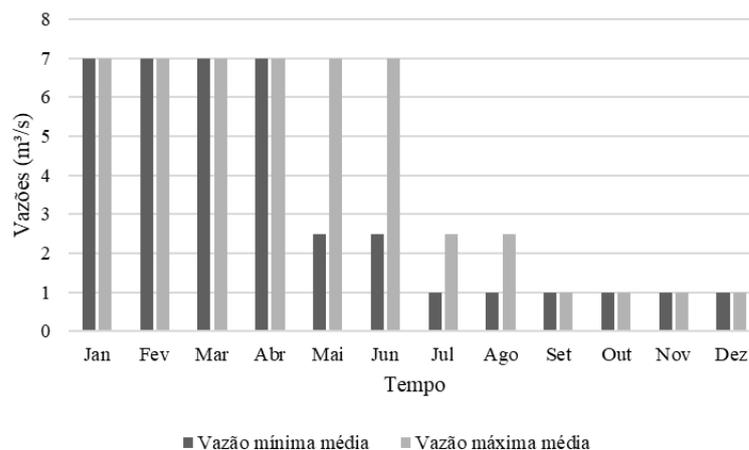
A resolução ainda determina que, excepcionalmente, será permitida a captação da vazão máxima diária de 114,3 m³/s e instantânea de 127 m³/s, quando o nível de água do reservatório de Sobradinho estiver acima do menor valor entre: a) nível correspondente ao armazenamento de 94% do volume útil; e b) nível correspondente ao volume de espera para controle de cheias. Dessa forma, os montantes a serem retirados para cada eixo ficam assim divididos:

- O Eixo Leste com vazão máxima média diária de adução de 25,2 m³/s e vazão máxima instantânea de adução de 28 m³/s;
- O Eixo Norte com vazão máxima média diária de 89,1 m³/s e vazão máxima instantânea de adução de 99 m³/s.

A repartição das vazões disponibilizadas para cada estado contemplado pelo Eixo Leste no ano de 2021, e as previsões de repartição para 2022 e 2023 são estabelecidas no PGA 2021, por meio da resolução nº 59, de 31 de dezembro de 2020 da ANA. Segundo o documento, caso a CODEVASF não disponibilize o volume mínimo previsto no PGA em determinado mês, esse volume poderá ser realocado nos meses subsequentes, atendendo a pedido da Operadora Estadual, e sendo respeitado o volume total anual.

Para 2021 são apresentadas vazões mínimas médias mensais e máximas médias mensais disponibilizadas para cada estado. Os valores correspondentes ao estado da Paraíba, beneficiado pelo Eixo Leste são mostrados na Figura 37. As finalidades estabelecidas para uso são abastecimento humano e irrigação e demais usos. As categorias de usuários estão divididas entre a Operadora Estadual, Sistemas Isolados de Abastecimento de Água - SIAA e Pequenas Comunidades Agrícolas.

Figura 37 - Vazões mínimas e máximas distribuídas pelo PISF para a Paraíba no ano de 2021



Fonte: Adaptado de ANA (2020b).

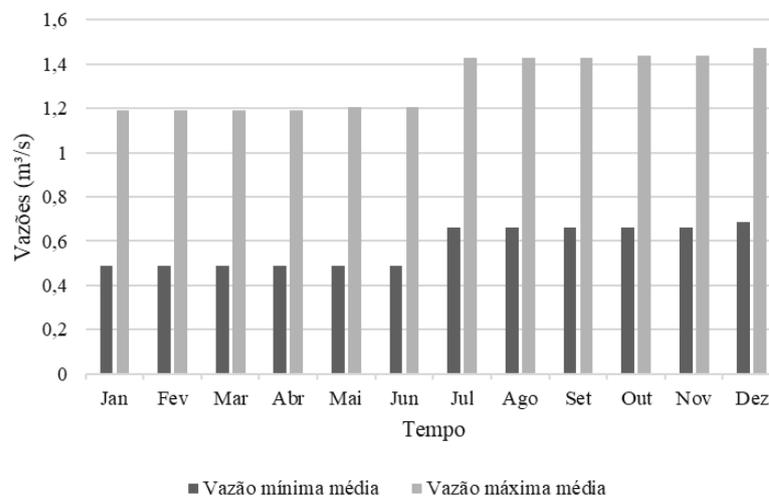
A Paraíba é o estado que recebe os maiores volumes de água provenientes do Eixo Leste, com vazão máxima de 7 m³/s. As maiores vazões recebidas pelo estado se concentram no primeiro semestre do ano, quando as condições para a transferência de água são mais favoráveis e há menos perdas. No segundo semestre é transferida uma vazão mínima necessária para atender usos contínuos. Para os anos de 2022 e 2023, somente estão previstas no PGA 2021 as vazões mínimas médias mensais, correspondentes aos mesmos valores e distribuição ao longo do ano que foram estabelecidas para 2021.

A AESA é a instituição que foi indicada pela Paraíba para exercer a função de operadora estadual do PISF, trabalhando em parceria com a CAGEPA no gerenciamento da infraestrutura de água bruta. A água que é aduzida nos cursos d'água e canais é de responsabilidade da AESA, enquanto a água que é escoada por adutoras, tanto na forma bruta como tratada, é gerenciada pela CAGEPA, sendo assim a principal usuária dos recursos hídricos no estado (CBHSF, 2019).

Dessa forma, a maior parcela das águas provenientes do PISF que chegam na Paraíba são destinadas para a AESA, e conseqüentemente usadas pela CAGEPA nos sistemas de abastecimento da população da região. O aporte dessas águas em 2017 foi responsável pelo abrandamento da situação crítica de iminente colapso dos níveis dos reservatórios da bacia, principalmente o Epitácio Pessoa.

As vazões destinadas ao estado de Pernambuco no trecho beneficiado pelo Eixo Leste são apresentadas na Figura 38. As finalidades determinadas para o uso da água são o abastecimento humano e a irrigação e demais usos, divididas entre as categorias de usuários Operadora Estadual e Sistemas Isolados de Abastecimento de Água.

Figura 38 - Vazões mínimas e máximas distribuídas pelo PISF para Pernambuco no ano de 2021

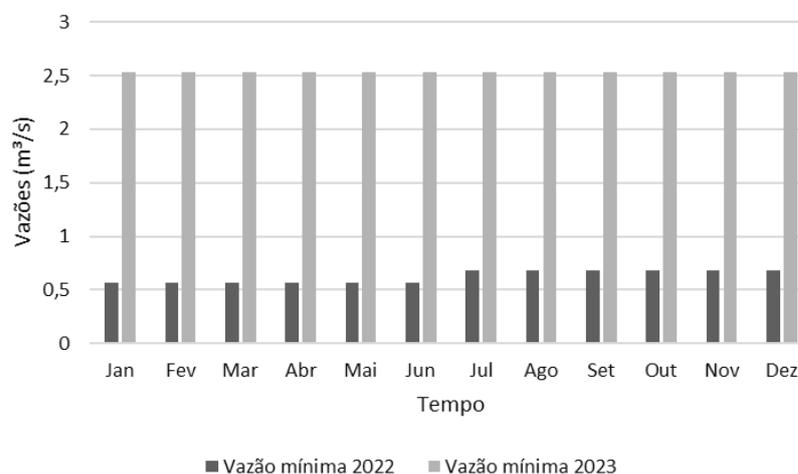


Fonte: Adaptado de ANA (2020b).

Em Pernambuco, as vazões máximas são consideravelmente menores que as recebidas pela Paraíba, chegando apenas a cerca de 1,5 m³/s. Os maiores volumes previstos são destinados à operadora estadual, a Agência Pernambucana de Águas e Climas - APAC, e direcionados à Companhia Pernambucana de Saneamento - COMPESA que opera o conjunto de adutoras destinadas ao abastecimento urbano. Foi previsto na concepção do empreendimento o beneficiamento de comunidades rurais situadas às margens dos canais e reservatórios, na forma de Vilas Produtivas Rurais e dos já mencionados Sistemas Isolados de Abastecimento.

No caso das vazões previstas para 2022 e 2023, Pernambuco passará a contar no último ano com uma derivação de 2 m³/s a partir do reservatório Barro Branco, destinada para a operação do Ramal do Agreste, o que explica a diferenciação entre as vazões mínimas nos dois anos mostrada na Figura 39.

Figura 39 - Vazões previstas mínimas distribuídas pelo PISF para Pernambuco nos anos de 2022 e 2023



Fonte: Adaptado de ANA (2020b).

Diante dos números expostos, existe uma preocupação a respeito da sustentabilidade da obra que foi projetada para bombear até 127 m³/s nos dois eixos em circunstâncias excepcionais, porém, durante prolongados períodos, bombeará vazões que estarão restritas ao valor máximo de 26 m³/s outorgado.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Nesta seção serão apresentadas as conclusões obtidas quanto à qualidade da água ao longo do Eixo Leste do PISF obtidas após a análise e discussão dos resultados da pesquisa, assim como as recomendações para seguimento de trabalhos futuros.

5.1 CONCLUSÕES

Para a avaliação da qualidade da água do Eixo Leste do PISF, foram explorados dados de 19 estações de monitoramento situadas nas bacias GI 3, do rio Pajeú, do rio Moxotó e do rio Paraíba, desde o ponto de captação da água no reservatório Itaparica, percorrendo os reservatórios projetados entre os canais, além dos açudes receptores das águas do projeto. O período analisado correspondeu às dez campanhas de monitoramento ocorridas entre os anos de 2014 e 2019, e foram estudados 21 parâmetros de qualidade da água.

Através da análise dos parâmetros físico-químicos foi possível verificar, primeiramente, que os reservatórios da bacia do Paraíba apresentaram piores condições em relação a vários parâmetros que violaram os limites recomendados pela Resolução CONAMA 357/2005, quando comparados com as águas do rio São Francisco. A partir do início da pré-operação do Eixo Leste do PISF em 2017, foi observada uma melhoria da qualidade das águas dos reservatórios paraibanos, particularmente na diminuição dos níveis encontrados nas variáveis salinidade, condutividade elétrica e alcalinidade total, porém, isso não ocorreu de forma homogênea nos pontos da bacia receptora. Ainda, as variáveis que apresentaram diferenciação mais significativa quando comparados os períodos seco e chuvoso foram a temperatura da água, o pH, os coliformes termotolerantes e o nitrogênio amoniacal.

Os resultados do IQA classificaram as águas das bacias envolvidas no Eixo Leste predominantemente nas classes Boa e Ótima, à exceção da bacia do Paraíba, onde preponderaram as classes Boa e Regular, com dois episódios da classe Ruim ocorridos em 2014 e 2015. Ao serem comparados os resultados do índice antes e depois da chegada das águas do São Francisco, percebeu-se que as amostras dos reservatórios da bacia receptora apresentaram classificação de qualidade Boa com maior frequência.

Em relação ao IET, nos reservatórios projetados e no ponto de captação foi observada a maioria de ocorrências de estado Oligotrófico e Ultraoligotrófico. Porém, na campanha 22, ocorrida em 2017, quase todas as estações da bacia do Moxotó apresentaram estado Eutrófico, indicando possíveis cargas de contaminação na água, o que ao longo das seguintes campanhas

apresentou melhora. Os valores do índice obtidos para a bacia do Paraíba mostraram que, o início da operação do Eixo Leste colaborou com a melhora da qualidade da água principalmente nas estações correspondentes a ambientes lóticos, localizadas em trechos de rio.

Os resultados das campanhas anteriores à entrada das águas do São Francisco na bacia do Paraíba certamente foram influenciados pelos baixos volumes dos reservatórios devido à seca prolongada na região, ocasionando um aumento da concentração de nutrientes derivados da poluição nos corpos hídricos. É necessário dar prosseguimento ao estudo para analisar se a tendência de melhora nos parâmetros de qualidade da água da bacia se mantém ao longo do tempo, com maior série de dados após o início da recepção de águas do PISF na Paraíba.

A Análise de Componentes Principais evidenciou na composição da qualidade das águas do Eixo Leste alta participação de variáveis de origem mineralógica, como salinidade, condutividade, dureza e alcalinidade, além de variáveis relacionadas com a poluição antropogênica, como DBO, DQO, clorofila-a e compostos de fósforo e nitrogênio. Ainda, verificou-se que as águas das bacias GI3, Moxotó e Pajeú são similares nos valores de suas variáveis, o que indica a não ocorrência de grandes alterações na qualidade da água ao longo do percurso do Eixo Leste, corroborada pelo IQA e IET.

Os dendrogramas gerados através da Análise de Agrupamentos aplicada às variáveis estudadas apresentaram-se distintos nos períodos chuvoso e seco. Ambos formaram três grupos de amostras semelhantes, porém, no primeiro caso, os reservatórios projetados e o ponto de captação no reservatório Itaparica formaram um grande grupo. No caso do período seco, os pontos da bacia do Paraíba que correspondem a ambientes lóticos foram incluídos no grande grupo dos reservatórios projetados e do ponto de captação. Entretanto, isso se explica pelo fato de as estações estarem secas na maioria das campanhas avaliadas, além de melhor qualidade da água nas campanhas com dados. Nos dois dendrogramas ocorreu um grupo com apenas uma estação isolada.

A repartição das vazões destinadas ao Eixo Leste no Plano de Gestão Anual 2021 do PISF revelou que são recebidos maiores volumes e que há uma distribuição distinta dos valores ao longo do ano no estado da Paraíba, com vazão máxima de 7 m³/s. Pernambuco chegará a receber uma vazão máxima de cerca de 1,5 m³/s em 2021, e para 2023 está previsto o acréscimo de 2 m³/s a serem destinados ao Ramal do Agreste. A importância do PISF e do início da pré-operação do Eixo Leste fica evidenciada no fato de que ele foi responsável pelo alívio da situação crítica de iminente colapso de abastecimento na qual se encontrava a região de Campina Grande, na Paraíba.

5.2 RECOMENDAÇÕES

As informações sobre a dinâmica da qualidade da água no Eixo Leste do PISF, principalmente no tocante aos efeitos percebidos pela bacia receptora, ainda são limitadas devido à recém operação do projeto. Espera-se que as águas do São Francisco melhorem a qualidade dos parâmetros observados na bacia do Paraíba, porém vários fatores devem ser levados em consideração nesta questão.

O fato de o saneamento ainda ser um ponto deficitário no Semiárido, sobretudo no que se refere ao tratamento de esgotos, gera grande preocupação por esses despejos estarem sendo realizados diretamente nas fontes de água que suprem a população. Ainda, o caso da poluição difusa gerada pela agricultura também é importante e deve ser considerado. Esses fatores têm potencial de prejudicar de forma relevante o funcionamento do PISF como provedor de água para abastecimento humano, um projeto de alto custo e valor, que não pode ser negligenciado.

Dessa forma, precisam ser examinadas estratégias para controle do aporte de nutrientes nos corpos hídricos envolvidos no projeto, com o tratamento e o reuso dos efluentes vindos das áreas urbanas, bem como da carga proveniente do uso de agrotóxicos nos perímetros irrigados estabelecidos na região. Ainda, na região do reservatório Itaparica devem ser manejadas de forma adequada as cargas oriundas da atividade de piscicultura, especialmente as localizadas mais próximas à captação de água. Conjuntamente, o controle do uso do solo, da erosão e do aporte de sedimentos nos entornos dos reservatórios, preservando também a sua mata ciliar, são aconselhados.

Recomenda-se também o fortalecimento da parceria entre as instituições que realizam o controle ambiental nos diversos níveis (ANA, Secretarias Estaduais e Municipais de Meio Ambiente e Recursos Hídricos), no sentido de garantir acompanhamento, regularização e fiscalização mais eficazes nas citadas atividades que causam impactos na qualidade da água.

O monitoramento da qualidade da água do PISF realizado pelo Ministério do Desenvolvimento Regional deve ser continuado, como prevê a condicionante da licença ambiental do empreendimento, além de possivelmente ampliada a sua frequência em pontos que demonstrarem condições desfavoráveis e ameaçadoras ao uso da água para abastecimento público. Complementando o monitoramento, sugere-se a implementação de um banco de dados do projeto que possa ser disponibilizado ao público, propiciando em consequência a geração de conhecimento e o incentivo à pesquisa na região.

No caso dos reservatórios projetados, é importante a intensificação das ações de educação ambiental previstas nos programas ambientais do PISF, devido ao fato de os corpos

hídricos estarem sendo utilizados pela população para lazer, onde foram identificados diversas vezes o descarte de resíduos nas águas. É primordial a participação e apoio da comunidade local para garantir a qualidade e uso sustentável e racional dos recursos hídricos que promovem a melhora na sua própria condição de vida.

A futuros estudos da qualidade da água no âmbito do PISF, são indicadas análises ainda mais aprofundadas, que utilizem ainda mais parâmetros relevantes para a saúde humana, além da investigação de questões biológicas como o fitoplâncton e zooplâncton e sua interação com os parâmetros físico-químicos. Pesquisas complementares de perspectivas sociais de atendimento à população e custos envolvidos na operação também são recomendadas, subsidiando uma análise integrada contínua dos impactos positivos e negativos do projeto na realidade brasileira.

Espera-se que este estudo possa contribuir com o avanço das pesquisas e conhecimento acerca da qualidade da água do Eixo Leste do PISF, subsidiando a tomada de decisão e o planejamento de estratégias que viabilizem o uso sustentável dos recursos hídricos na região. A complexidade do empreendimento exige que sejam considerados diversos atores na sua gestão, cada um com seu papel fundamental no sucesso dos esforços praticados.

REFERÊNCIAS

- ADAMOVICH, B.V.; MEDVINSKY, A.B.; NIKITINA, L.V.; RADCHIKOVA, N.P.; MIKHEYEVA, T.M.; KOVALEVSKAYA, R.Z.; VERES, Y.K.; CHAKRABORTY, A.; RUSAKOV, A.V.; NURIEVA, N.I.; ZHUKOVA, T.V. Relations between variations in the lake bacterioplankton abundance and the lake trophic state: Evidence from the 20-year monitoring. *Ecological Indicators*, v.97, p.120-129, 2019.
- AESA – AGÊNCIA EXECUTIVA DE GESTÃO DAS ÁGUAS DA PARAÍBA. *Volume de açudes: Açude Poções*. 2020. Disponível em: <http://www.aesa.pb.gov.br/aesa-website/monitoramento/volume-acude/?id_acude=485> Acesso em: 15 nov. 2020.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. *Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: regiões hidrográficas brasileiras – Edição Especial*. Brasília: ANA, 2015.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. *Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2017: relatório pleno/Agência Nacional de Águas*. Brasília: ANA, 2017a.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. *Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2018: informe anual/Agência Nacional de Águas*. Brasília: ANA, 2018.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. *Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2019: informe anual/Agência Nacional de Águas*. Brasília: ANA, 2019.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. *Reservatórios do semiárido brasileiro: hidrologia, balanço hídrico e operação: Anexo A*. Brasília: ANA, 2017b.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Resolução nº 411, de 22 de setembro de 2005. *Outorga ao Ministério da Integração Nacional o direito de uso de recursos hídricos do Rio São Francisco, para a execução do Projeto de Integração do Rio São Francisco com as Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional*. Brasília, 22 set. 2005.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. *Enquadramento dos corpos d'água em classes*. Brasília: ANA, 2020a.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Resolução nº 59, de 31 de dezembro de 2020. *Dispõe sobre o Plano de Gestão Anual –PGA referente ao ano de 2021 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*. Brasília, 31 dez. 2020b.
- 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 Resour. Manage.* v.25, n.8, p.1915-1934, 2011. <https://doi-org/10.1007/s11269-011-9781-6>
- 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. In: Workshop Internacional sobre Água no Semiárido Brasileiro, Campina Grande, 2017.

AQUINO, F. L. *Definição de Indicadores de Desempenho para o Sistema PISF – Projeto de Integração do Rio São Francisco com Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional*. 2019. 177p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. Brasília, 2019.

AZEVÊDO, E.L.; ALVES, R.R.N.; DIAS, T.L.P.; MOLOZZI, J. How do people gain access to water resources in the Brazilian semiarid (Caatinga) in times of climate change? *Environmental Monitoring and Assessment*, 189:375, 2017.

AZEVEDO, L. G. T. et al. *Transferência de água entre bacias hidrográficas*. Brasília: Banco Mundial, 2005.

BARRETO, L. V.; ROCHA, F. A.; OLIVEIRA, M. S. C. Monitoramento da qualidade da água na microbacia Hidrográfica do rio catolé, em Itapetinga - BA. *Centro Científico Conhecer – Enciclopédia Biosfera*, Goiânia, v.5, n.8, p.1-9, 2009.

BERTOSSI, A. P. A.; MENEZES, J. P. C.; CECÍLIO, R. A.; GARCIA, G. O.; NEVES, M. A. Seleção e agrupamento de indicadores da qualidade de águas utilizando Estatística Multivariada. *Semina: Ciências Agrárias*, v. 34, n. 5, p. 2025-2036, 2013.

BHAGOWATI, B.; AHAMAD, K.U. A review on lake eutrophication dynamics and recent developments in lake modeling. *Ecohydrology & Hydrobiology*, v. 19, p. 155-166, 2019.

BRAGA, B.; HESPANHOL, B.; CONEJO, J. G. L.; BARROS, M. T. L.; SPENCER, M.; PORTO, M.; NUCCI, N.; JULIANO, N.; EIGER, S. *Introdução à Engenharia Ambiental: O desafio do desenvolvimento sustentável*. São Paulo: Prentice Hall, 318 p., 2005.

BRAGA, B. P. F.; FLECHA, R.; PENA, D. S.; KE LMAN, J. Pacto federativo e gestão de águas. *Estudos avançados*, São Paulo, v. 22, n. 63, p. 17-42, 2008.

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*. Brasília, 20 dez. 2006.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 08 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*. Brasília, 09 jan. 1997.

BRASIL. Resolução nº 411, de 22 de setembro de 2005. *Dispõe sobre a outorga do Direito de Uso de Recursos Hídricos do Rio São Francisco*. Brasília, 23 set. 2005.

BRASIL. Secretaria de Vigilância em Saúde. *Vigilância e controle da qualidade da água para o consumo*. Brasília, 2006. 212 p.

BROGNA, D.; DUFRÊNE, M.; MICHEZ, A.; LATLI, A.; JACOBS, S.; VINCKE, C.; DENDONCKER, N. Forest cover correlates with good biological water quality. Insights from a regional study (Wallonia, Belgium). *Journal of Environmental Management*, v. 211, p. 9-21, 2018.

- CALADO, T. O. *Análise da relação do uso do solo com a qualidade da água do açude Epitácio Pessoa no Eixo Leste do Projeto de Integração do rio São Francisco*. 2020. 145 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento e Meio ambiente - PRODEMA, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2020.
- CALAZANS, G.M.; PINTO, C.C.; COSTA, E.P.; PERINI, A.F.; OLIVEIRA, S.C. The use of multivariate statistical methods for optimization of the surface water quality network monitoring in the Paraopeba river basin, Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190:491, 2018.
- CAPELLARI, A.; CAPELLARI, M. B. A água como bem jurídico, econômico e social: A necessidade de proteção das nascentes. *CIDADES*, Lisboa, n. 36, p. 83-94, jun. 2018.
- CARVALHO, A. P.; MORAES NETO, J. M.; LIMA, V. L. A.; SOUSA, R. F.; SILVA, D. G. K. C. Aspectos qualitativos da água do açude de Bodocongó em Campina Grande - PB. *Engenharia Ambiental*, Espírito Santo do Pinhal, v.5, n.2, p.94-109, 2008.
- CBHSF - COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO. *PISF 2019: Gestão e operação do Projeto de Integração do rio São Francisco com Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional*. Belo Horizonte: 156 p., 2019.
- CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Apêndice D: Índices de Qualidade das Águas. In: CETESB. *Qualidade das Águas Interiores no Estado de São Paulo 2018*. São Paulo: CETESB, 2019a. p. 1-32.
- CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Apêndice E: Significado ambiental e sanitário das variáveis de qualidade das águas e dos sedimentos e metodologias analíticas e de amostragem. In: CETESB. *Qualidade das Águas Interiores no Estado de São Paulo 2018*. São Paulo: CETESB, 2019b. p. 1-58.
- CHEN, L.; YANG, Z.; LIU, H. Assessing the eutrophication risk of the Danjiangkou Reservoir based on the EFDC model. *Ecological Engineering*, v. 96, p. 117-127, 2016.
- CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº 001, de 23 de janeiro de 1986. Dispõe sobre critérios básicos e diretrizes gerais para a avaliação de impacto ambiental. *Diário Oficial da União*. Brasília, 17 fev. 1986.
- CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº 237, de 19 de dezembro de 1997. Dispõe sobre a revisão e complementação dos procedimentos e critérios utilizados para o licenciamento ambiental. *Diário Oficial da União*. Brasília, 22 dez. 1997. n. 247, Seção 1, p. 30841-30843.
- CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução 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 União*. Brasília, 18 mar. 2005. n. 053, p. 58-63.
- COSTA, E.P.; PINTO, C.C.; SOARES, A.L.C.; MELO, L.D.V.; OLIVEIRA, S.M.A.C. Evaluation of violations in water quality standards in the monitoring network of São

- Francisco River basin, the third largest in Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189: 590, 2017.
- COSTA, F. N.; OLIVEIRA, Y. R.; SILVA, P. H.; FERREIRA, P. M.; PACHECO, A. C.; ABREU, M. C. Avaliação da qualidade hídrica de um rio do semiárido piauiense. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, v. 03, n.02, p. 218-225, 2018.
- DEMANBORO, A. C. Gestão ambiental e sustentabilidade na macrometrópole paulista - Bacia do Rio Paraíba do Sul. *Sociedade & Natureza*, Uberlândia, v. 27, n. 3, p. 515-529, dez. 2015.
- ESTEVES, F. A. *Fundamentos de limnologia*. Rio de Janeiro: Ed. Interciência, 3ª edição, 826 p., 2011.
- FARIAS, E. E. V.; CURI, W. F.; DINIZ, L. S. São Francisco river Integration Project, Eastern Axis: losses analysis and performance indicators. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 22, e.47, 2017.
- FARTO, C. D.; SILVA, T. C. Variações da qualidade da água de chuva e de açudes armazenada em cisternas em municípios do semiárido do estado da Paraíba. *Eng. Sanit. Ambient*, v. 25, n. 6, p. 1-13, 2020.
- FÁVERO, L. P. L.; BELFIORE, P. P. *Manual de análise de dados: estatística e modelagem multivariada com excel, SPSS e stata*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017. 1187p.
- FERREIRA, A. L. N. *Análise integrada da qualidade de água dos corpos hídricos do projeto de integração do Rio São Francisco no nordeste do Brasil*. 2016. 148 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, CTG, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016.
- FIA, R.; TADEU, H. C.; MENEZES, J. P. C.; FIA, F. R. L.; OLIVEIRA, L. F. C. Qualidade da água de um ecossistema lótico urbano. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 20, n.1, p. 267-275, 2015.
- FORNARELLI, R.; ANTENUCCI, J.P.; MARTI, C.L. Disturbance, diversity and phytoplankton production in a reservoir affected by inter-basin water transfers. *Hydrobiologia*, v. 705, p. 9–26, 2013.
- FORNARELLI, R.; ANTENUCCI, J.P. The impact of transfers on water quality and the disturbance regime in a reservoir. *Water Research*, v. 45, p. 5873-5885, 2011.
- FORNARELLI, R.; GALELLI, S.; CASTELLETI, A.; ANTENUCCI, J.P.; MARTI, C.L. An empirical modeling approach to predict and understand phytoplankton dynamics in a reservoir affected by interbasin water transfers. *Water Research*, v. 49, p. 3626-3641, 2013.
- FRANCA, R. M.; GOMES, M. C. R.; SILVA, F. J. A.; LIMA, M. G. S.; FRISCHKORN, H. Análise multivariada dos parâmetros de qualidade das águas subterrâneas em Juazeiro do Norte – CE (Brasil). *Revista Águas Subterrâneas*, v. 32, n. 1, p. 106-113, 2018.

GARCIA, H. L.; SILVA, V. L.; MARQUES, L. P.; GARCIA, C. A. B.; ALVES, J. P. H.; SILVA, M. G.; CARVALHO, F. O. Nível trófico do reservatório de Jacarecica I – Sergipe - Brasil. *Scientia Plena*, Sergipe, v. 8, n. 7, 2012.

GIBBINS, C.N., JEFFRIES, M., SOULSBY, C. Impacts of an inter-basin water transfer: distribution and abundance of *Micronecta poweri* (Insecta: Corixidae) in the River Wear, North-East England. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*. 10, 103–115, 2000.

GIRI, S.; QIU, Z. Understanding the relationship of land uses and water quality in Twenty First Century: a review. *Journal of Environmental Management*, v. 173, p. 41-48, 2016.

GOMES, J. L.; BARBIERI, J. C. Gerenciamento de recursos hídricos no Brasil e no Estado de São Paulo: um novo modelo de política pública. *Cad. EBAPE.BR*, Rio de Janeiro, v. 2, n. 3, p. 01-21, Dec. 2004.

GOMES, M.C.R.; CAVALCANTE, I. N. Aplicação da análise estatística multivariada no estudo da qualidade da água subterrânea. *Revista brasileira de águas subterrâneas*. v. 31. n.1, p. 134-149, 2017.

GONÇALVES, J.; SARDINHA, D.; SOUZA, A.; DIBIAZI, A.; GODOY, L.; CONCEIÇÃO, F. Avaliação espaço-temporal da qualidade da água e simulação de autodepuração na bacia hidrográfica do córrego São Simão, SP. *Ambi-Água, Taubaté*, v. 7, n. 3, p. 141-154, 2012.

GONDIM, J., FIOREZE, A. P., ALVES, R. F. F., SOUZA, W. G. *Seção 4 – A seca atual no Semiárido nordestino – Impactos sobre os recursos hídricos*. Parcerias Estratégicas. Brasília – DF, v. 22, n. 44, p. 277 – 300, 2017.

GOTELLI, N.J.; ELLISON, A.M. *Princípios de estatística em ecologia*. Porto Alegre: Artmed, 2011. 528p.

GUNKEL, G. Capacidade de carga e o uso múltiplo da água de reservatórios-Eutrofização versus Re-Oligotrofização - Parte do projeto “INNOVATE”. In: XI SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, João Pessoa, 2012.

GUNKEL, G.; SELGE, F.; KEITEL, J.; LIMA, D.; CALADO, S.; SOBRAL, M.; RODRIGUEZ, M.; MATTA, E.; HINKELMANN, R.; CASPER, P.; HUPFER, M. Water management and aquatic ecosystem services of a tropical reservoir (Itaparica, São Francisco, Brazil). *Regional Environmental Change*, v. 18, p. 1913-1925, 2018.

GUPTA, J; VAN DER ZAAG, P. Interbasin water transfers and integrated water resources management: Where engineering, science and politics interlock. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, v. 33, p. 28-40, 2008.

HAIR, J. J. F.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L.; BLACK, W. C. *Análise multivariada de dados*. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009. 687 p.

HE, S.; HIPEL, K.W.; KILGOUR, D.M. Water Diversion Conflicts in China: A Hierarchical Perspective. *Water Resour. Manage.* v.28, n.7, p. 1823-1837, 2014.

HU, L.; HU, W.; ZHAI, S.; WU, H. Effects on water quality following water transfer in Lake Taihu, China. *Ecological Engineering*, v. 36, p. 471-481, 2010.

IBAMA - INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. *Licença de Operação nº1464/2018*. Referente ao Eixo Leste do Projeto de Integração do Rio São Francisco com as Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional - PISF. Brasília, 2018.

IBAMA - INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. *Licença Prévia nº 200/2005*. Relativa ao Projeto de Integração do Rio São Francisco com as Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional, empreendimento de infraestrutura hídrica de inserção regional, em consonância com a Resolução nº 029/2005 da Agência Nacional de Águas, que dispõe sobre a outorga preventiva. Brasília, 2005.

IBAMA - INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. *Portaria nº 715, de 20 de setembro de 1989*. Enquadra os cursos d'água da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, na classificação estabelecida pela RESOLUÇÃO CONAMA nº 20/1986. Brasília, 1989.

JARDIM, F. A.; VON SPERLING, E.; JARDIM, B.; ALMEIDA, K. Fatores determinantes das florações de cianobactérias na água do Rio Doce, Minas Gerais, Brasil. *Eng Sanit Ambient* 19: 207-218, 2014.

JOLLIFFE, I.T.; CADIMA, J. Principal component analysis: a review and recent developments. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 374(2065): 20150202. 2016.

JÚNIOR, R. J. A. *Evolução temporal dos níveis tróficos do açude Epitácio Pessoa, Semiárido paraibano*. 2009. 70f. Dissertação (Mestrado) – Ciência e Tecnologia Ambiental, Universidade Estadual da Paraíba, 2009.

KRIVONOGOV, S.K.; BURR, G.S.; KUZMIN, Y.V.; GUSSKOV, S.A.; KURMANBAEV, R.K.; KENSHINBAY, T.I.; VOYAKIN, D.A. The fluctuating Aral Sea: a multidisciplinary-based history of the last two thousand years. *Gondwana Res* 26:284–300, 2014.

LE MOAL, M.; GASCUEL-ODOUX, C.; MÉNESGUEN, A.; SOUCHON, Y.; ÉTRILLARD, C.; LEVAIN, A.; MOATAR, F.; PANNARD, A.; SOUCHU, P.; LEFEBVRE, A.; PINAY, G. Eutrophication: A new wine in an old bottle? *Science of The Total Environment*, v. 651, p. 1-11, 2019.

LIMA, A. E.; SEVERI, W. Estado trófico na cascata de reservatórios de um rio no semiárido brasileiro. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v. 9, p. 124-133, 2014.

LIMA, W. S.; GARCIA C. A. B. Qualidade da água em Ribeirópolis - SE: O Açude do Cajueiro e a Barragem do João Ferreira. *Scientia Plena*, Sergipe, v.4, n. 12, 2008.

LHWC - LESOTHO HIGHLANDS WATER COMMISSION (Kingdom of Lesotho Republic of South Africa). *Project description*. Disponível em: <<http://www.lhda.org.ls/lhdaweb>>. Acesso em: 17 jun. 2019.

LOPES, H.; SOBRAL, M. C.; GUNKEL, G.; CANDEIAS, A. L.; MELO, G. Comportamento espacial da clorofila-a no reservatório de Itaparica, rio São Francisco. *Engenharia Sanitária e Ambiental*. Rio de Janeiro, v. 20, n. 3, p. 475-484, 2015.

MACHADO, E. S.; KNAPIK, H. G.; BITENCOURT, C. C. A. Considerações sobre o processo de enquadramento de corpos de água. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, v. 24, n. 2, p. 261-269, abr. 2019.

MAIA, A. A. D.; CARVALHO, S. L.; CARVALHO, F. T. Comparação de dois índices de determinação do grau de trofia nas águas do Baixo Rio São José dos Dourados, São Paulo, Brasil. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v.20, n.4, p. 613-622, 2015.

MALLYA, G.; HANTUSH, M.; GOVINDARAJU, R. S. Composite measures of watershed health from a water quality perspective. *Journal of Environmental Management*, v. 214, p. 104-124, 2018.

MARENCO, J. A. Água e mudanças climáticas. *Estudos avançados*, São Paulo, v. 22, n. 63, p. 83-96, 2008.

MARMONTEL, C. V. F.; RODRIGUES, V. A. Parâmetros Indicativos para Qualidade da Água em Nascentes com Diferentes Coberturas de Terra e Conservação da Vegetação Ciliar. *Floresta Ambient.*, Seropédica, v. 22, n. 2, p. 171-181, 2015.

MARQUES, É. T.; OLIVEIRA, C. R.; CARDOSO, A. S.; CUNHA, M. C. C.; SOBRAL, M. C. Qualidade da água em trecho do Eixo Leste do Projeto de Transposição do rio São Francisco, Brasil. In: 30º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2019, Natal. *Anais...* Natal: Congresso ABES, 2019.

MASCARENHAS, G. L.; CUNHA, M. C.; MATINS, L. R.; FERREIRA, J. T.; LOPES, D. V. 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*, Recife, v. 6, n. 5, p.1050 - 1068, 2013.

MDR – MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL. *Projeto São Francisco*. Disponível em: <<https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos-nova/seguranca-hidrica/projeto-sao-francisco/o-projeto>>. Acesso em: 03 out. 2019a.

MDR – MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL. *Sumário Executivo - Projeto de Integração do Rio São Francisco*. Brasília: MDR, 20 p, 2019b.

MELO, G. L. *Estudo da qualidade da água no reservatório de Itaparica localizado na bacia do São Francisco*. 2007. 97 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.

MENDES, C. F.; BARBOSA, V. V.; NERY, J. F.; FERREIRA, J. F. N.; BARBOSA, J. E. L. O sucesso das cianobactérias nos reservatórios do Semiárido: uma revisão de literatura. In: XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2017, Florianópolis. *Anais...* Florianópolis, 2017.

MILAN, B.F. Clean water and sanitation for all: interactions with other sustainable development goals. *Sustain. Water Resour. Manag.* 3, 479–489 (2017).

MI - MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. *RIMA - Projeto de Integração do Rio São Francisco com as Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional*. Brasília: MIN, 2004, 136 p.

MI - MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. *Diagnóstico Socioambiental: Sub-Bacia GI3 Reservatórios Areias, Braúnas e Mandantes*. Brasília: MIN, 297 p., 2016a.

MI - MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. *Diagnóstico Socioambiental: Sub-Bacia Moxotó*. Brasília: MIN, 418 p., 2016b.

MI - MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. *Diagnóstico Socioambiental: Sub-Bacia Pajeú Reservatórios Salgueiro, Muquém, Cacimba Nova e Bagres*. Brasília: MIN, 401 p., 2016c.

MS - MINISTÉRIO DA SAÚDE. *Portaria de consolidação de nº 5 de 28 de setembro de 2017*. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Brasília: Ministério da Saúde, 2017.

MORAIS, N. C.; SOUSA, M. F. D.; MEDEIROS, A. C.; MELO, W. F.; SILVEIRA, G. S.; MARACAJÁ, P. B. O processo de emancipação e a transferência de gestão no perímetro público de irrigação várzeas de Sousa – PB. *INTESA - Informativo Técnico do Semiárido (Pombal-PB)*, v. 12, n. 1, p. 55-64, Jan – Jun, 2018.

MOSLEY, L.M. Drought impacts on the water quality of freshwater systems; review and integration. *Earth-Science Reviews*, v.140, p. 203-214, 2015.

NACAR, S., METE, B. & BAYRAM, A. Estimation of daily dissolved oxygen concentration for river water quality using conventional regression analysis, multivariate adaptive regression splines, and TreeNet techniques. *Environ Monit Assess*, v. 192, p. 1-21, 2020.

OLIVEIRA, C. R. *Modelagem espaço-temporal e análise de cenários do uso da água para irrigação no trecho submédio da Bacia Hidrográfica do rio São Francisco*. 2019. 197 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

OLIVEIRA, D.; VARGAS, R.; SAAD, A.; ARRUDA, R.; DALMAS, F.; AZEVEDO, F. Land use and its impacts on the water quality of the Cachoeirinha Invernada Watershed, Guarulhos (SP). *Ambiente e Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, v. 13, n. 1, p. 1-17, 2018.

ONU - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. *Agenda 2030*. 2015. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/pos2015/agenda2030/>>. Acesso em: 10 abr. 2020.

PADIAL, P. R.; POMPÊO, M.; MOSCHINI-CARLOS, V. Heterogeneidade espacial e temporal da qualidade da água no reservatório Rio das Pedras (Complexo Billings, São Paulo). *Ambi-Água*, Taubaté, v. 4, n.3, p. 35-53, 2009.

PALACIO, F. X.; APODACA, M. J.; CRISCI, J. V. (2020). *Análisis multivariado para datos biológicos: teoría y su aplicación utilizando el lenguaje R*. 1ª ed. Fundación de Historia Natural Félix de Azara, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, 268p.

PALÁCIO, H. A. Q.; ARAÚJO NETO, J. R.; MEIRELES, A. C. M.; ANDRADE, E. M.; SANTOS, J. C. N.; CHAVES, L. C. G. Similaridade e fatores determinantes na salinidade das águas superficiais do Ceará, por técnicas multivariadas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 15, n. 4, p. 395-402, 2011.

PALMA, P.; ALVARENGA, P.; PALMA, V. L.; FERNANDES, R. S.; SOARES, A.; BARBOSA, I. R. Assessment of anthropogenic sources of water pollution using multivariate statistical techniques: a case study of the Alqueva's reservoir, Portugal. *Environ Monit Assess* 165:539–552, 2010.

PERES, J. M. *Avaliação da qualidade da água do rio São Francisco nos municípios de Petrolina-PE e Juazeiro-BA*. 2012. 108 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012.

PIRATOBA, A.; RIBEIRO, H.; MORALES, G.; GONÇALVES, W. Caracterização de parâmetros de qualidade da água na área portuária de Barcarena, PA, Brasil. *Ambi-Água*, Taubaté, v. 12, n.3, p. 435-456, 2017.

PRC - Office of the South-to-North Water Diversion Project Construction Committee, State Council. The South-to-North Water Diversion Project. Engineering. v.2, n.3, p.265-267, 2016.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. *R: a language and environment for statistical computing*. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2010. Disponível em: <<https://www.r-project.org/>>. Acesso em: 01 set. 2019.

ROSSITER, K. W. L. *Efeito da redução da vazão efluente do reservatório de Sobradinho na qualidade da água a jusante, sob o enfoque da vazão ecológica*. 2017. 145 p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.

SABESP - COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO. *Sistema Cantareira*. Disponível em: <<http://site.sabesp.com.br/site/interna/Default.aspx?secaoId=132>> Acesso em: 19 jun. 2019.

SANTOS, I. V. *Avaliação da qualidade da água do Açude Epitácio Pessoa em relação ao nível de água acumulado no período de 2015 e 2016*. 2017. 75 f. Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2017.

SANTOS, R.; VITAL, A.; FERREIRA, A.; FARIAS JÚNIOR, J. Qualidade da água na bacia do Alto Rio Paraíba em área da Transposição do São Francisco. In: X Congresso Nacional de Meio Ambiente de Poços de Caldas, 7, 2013, Poços de Caldas. *Anais...* Poços de Caldas: IF Sul de Minas Gerais, 2013.

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, A. E. P.; ANGELIS, C. F.; MACHADO, L. A. T.; WAICHAMAN, A. V. Influência da precipitação na qualidade da água do Rio Purus. *Acta Amaz.*, Manaus, v. 38, n. 4, p. 733-742, 2008.

SILVA, A. M. C.; 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, mai./ago. 2019.

SILVA, D. F.; GALVÍNCIO, J. D.; ALMEIDA, H. R. R. C. Variabilidade da qualidade de água na bacia hidrográfica do rio São Francisco e atividades antrópicas relacionadas. *Qualit@s Revista Eletrônica*, v. 9, n.3, 2010.

SILVA, G. M. N. *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*. 2019. 161 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

SILVA, M.B. R.; AZEVEDO, P. V.; ALVES, T. L. B. Análise da degradação ambiental no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba. *Boletim Goiano de Geografia*, Goiânia, v. 34, n. 1, p. 35-53, 2014.

SILVA, M.; AZEVEDO, P.; NETO, J.; ALVES, T. Diagnóstico das condições microbiológicas da água do Alto Curso do Rio Paraíba. In: X Congresso Nacional de Meio Ambiente de Poços de Caldas, 7, 2014, Poços de Caldas. *Anais... Poços de Caldas: IF Sul de Minas Gerais*, 2014.

SILVA, P. H. P.; RIBEIRO, M. M. R.; MIRANDA, L. I. B. Uso de cadeia causal na análise institucional da gestão de recursos hídricos em reservatório no semiárido da Paraíba. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, [s.l.], v. 22, n. 4, p.637-646, 2017.

SOULSBY, C., GIBBONS, C. N., ROBINS, T. Inter-basin water transfers and drought management in the Kielder/Derwent system. *Water and Environment Journal*, 13, 213-223, 1999.

STERNBERG, T. Water megaprojects in deserts and drylands. *Int. J. Water Resour*, 32, 301-320, 2016. doi: 10.1080/07900627.2015.1012660

SUDEMA - SUPERINTENDÊNCIA DE ADMINISTRAÇÃO DO MEIO AMBIENTE. *Diretriz nº 205, de 03 de março de 1988*. Enquadramento dos corpos d'águas da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba. Paraíba, 1988.

TCU – TRIBUNAL DE CONTAS DA UNIÃO. *Relatório de auditoria TC 008.894/2013-2*. 2013. Disponível em: <<https://contas.tcu.gov.br/sagas/SvlVisualizarRelVotoAcRtf?codFiltro=SAGAS-SESSAO-ENCERRADA&seOcultaPagina=S&item0=482200>> Acesso em: 03 out. 2019.

TUNDISI, J. G.; TUNDISI, T. M. *Limnologia*. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

UN – UNITED NATIONS. *Water*. 2020. Disponível em: <<https://www.un.org/en/sections/issues-depth/water/>> Acesso em: 14 set. 2020.

US BUREAU OF RECLAMATION. *Colorado-Big Thompson Project*. Disponível em: <<https://www.usbr.gov/projects/index.php?id=432>> Acesso em: 17 jun. 2019.

VARGAS, R.; BARROS, M.; SAAD, A.; ARRUDA, R.; AZEVEDO, F. Assessment of the water quality and trophic state of the Ribeirão Guaraçau Watershed, Guarulhos (SP): a comparative analysis between rural and urban areas. *Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, v. 13, n. 58, p. 1-13, 2018.

VASCONCELOS, J. F.; BARBOSA, J. E. L.; DINIZ, C. R.; CEBALLOS, B. S. O. Cianobactérias em reservatórios do Estado da Paraíba: ocorrência, toxicidade e fatores reguladores. *Boletim da Sociedade Brasileira de Limnologia*, Campinas v. 39, n. 2, p. 1-20, 2011.

VEGA, M.; PARDO, R.; BARRADO, E.; DEBÁN, L. Assessment of seasonal and polluting effects on the quality of river water by exploratory data analysis. *Water Research*, 32: 3581-3592, 1998.

VON SPERLING, M. *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos – Volume 1*. Belo Horizonte: UFMG, 2005.

WWF, 2007. *Pipedreams? Interbasin water transfers and water shortages*. Disponível em: <http://d2ouvy59p0dg6k.cloudfront.net/downloads/pipedreams_ibts_final_report_27_june_2007_1.pdf> Acesso em: 17 jun. 2019.

ZENG, Q.; QIN, L.; LI, X. The potential impact of an inter-basin water transfer project on nutrients (nitrogen and phosphorous) and chlorophyll a of the receiving water system. *Science of the Total Environment*, v. 536, p. 675–686, 2015.

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.

ZHU, Y. P.; ZHANG, H. P.; CHEN, L.; ZHAO, J. F. Influence of the South–North Water Diversion Project and the mitigation projects on the water quality of Han River. *Science of The Total Environment*. v. 406, p. 57-68, 2008.

ZOU, R.; ZANG, X.; LIU, Y.; CHEN, X.; ZHAO, L.; ZHU, X.; HE, B.; GUO, H. Uncertainty-based analysis on water quality response to water diversions for Lake Chenghai: A multiple-pattern inverse modeling approach. *Journal of Hydrology*, v. 514. p. 1-14, 2014.

APÊNDICE A - ARTIGO ACEITO PARA PUBLICAÇÃO

Artigo submetido à Revista DAE

Data de submissão: 12/03/2020

Data de aceite: 27/07/2020

Status: Aguardando publicação

Desafios da Gestão Ambiental na Transferência de Água entre Bacias: Estudo de Caso da Integração do Rio São Francisco, Brasil

Hidaiane Caldas¹; Antônio Italczy²; Maria do Carmo Sobral³; Davi Marwell⁴

¹Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco;

²Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco;

³Professora do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco;

⁴ Coordenador de Gestão Ambiental do Ministério de Desenvolvimento Regional.

Resumo

A transferência de água entre bacias tem sido uma solução adotada para mitigar os efeitos da distribuição desigual dos recursos hídricos. Este artigo trata de uma análise sobre os principais desafios em relação a gestão ambiental do Projeto de integração do rio São Francisco com as bacias do Nordeste Setentrional, situado em região semiárida do Brasil. O presente trabalho foi desenvolvido a partir de análises bibliográficas sobre o assunto e documentos oficiais acerca do empreendimento fornecidos pelo governo do Brasil. A partir da compilação das informações obtidas nas diversas bibliografias, foi possível identificar quatro principais desafios da gestão ambiental no âmbito do projeto: o conflito entre os setores energético e de irrigação, a operação do sistema de captação e distribuição da água ao longo dos canais, os impactos não abordados no estudo de impacto ambiental e as consequências do armazenamento da água em reservatórios. O enfrentamento das questões levantadas passa pela dinamização da matriz energética do país, adoção de modernas tecnologias de instrumentação e corpo técnico qualificado para operar o sistema para viabilizar a cobrança pelo uso das águas, maior controle e fiscalização das técnicas de manejo na irrigação na áreas, investimento em infraestrutura de saneamento básico, gestão do uso do solo na bacia, além do uso de dispositivos que diminuam a evaporação nos reservatórios. A consideração dos desafios da gestão ambiental identificados neste trabalho pode colaborar para o atendimento aos objetivos e à sustentabilidade do projeto de integração do rio São Francisco.

Palavras-chave: Gestão ambiental; Desafios; Transferências de água; Integração do Rio São Francisco.

Abstract

The interbasin water transfers has been a solution adopted to mitigate the effects of unequal distribution of water resources. This article deals with an analysis of the main challenges related to the environmental management of the integration project of the São Francisco river with the north-east basins located in the semiarid region of Brazil. The present work was developed from bibliographic analyzes on the subject and official documents about the enterprise provided by the Brazilian government. Based on the compilation of the information obtained in the various bibliographies, it was possible to identify four main environmental management challenges within the scope of the project: the conflict between the energy and irrigation sectors, the operation of the water abstraction and distribution system along the channels, the impacts not addressed in the environmental impact study and the consequences of water storage in reservoirs. The confrontation of the issues raised involves the dynamization of the country's energy matrix, adoption of modern instrumentation technologies and qualified technical staff to operate the system to enable the collection of water use, greater control and control of irrigation management techniques in areas, investment in basic sanitation infrastructure, management of land use in the basin, and the use of devices that reduce evaporation in reservoirs. The consideration of the challenges of environmental management identified in this work can contribute to meeting the objectives and sustainability of the integration project of São Francisco River.

Keywords: Environmental management; Challenges; Water transfers; Integration of São Francisco river.

ANEXO A - DADOS DE QUALIDADE DA ÁGUA

Tabela 16 - Resultados das análises de qualidade da água realizadas para as campanhas 16 a 25 do PISF

Campanha	Ponto	OD	DBO	Temp	pH	Turb	PT	NT	SDT	SST	Cl-a	Coli	CE	AT	DQO	DT	P-Orto	NO3	NO2	NH3	Sal	Feo-a
16	Q54	9,08	17,50	27,99	8,44	2,82	0,68	0,60	<LQ	105,00	<LQ	70,00	0,08	29,90	60,78	19,90	0,12	<LQ	<LQ	<LQ	0,00	<LQ
16	Q68	8,38	89,50	25,30	8,03	10,10	1,20	2,80	1112,00	24,00	7,00	13,00	1,99	279,10	229,47	249,20	0,20	2,00	0,20	<LQ	0,06	<LQ
16	Q69	2,69	37,30	26,29	7,25	200,00	1,19	2,40	62,00	321,00	93,20	>1.600	0,36	39,90	98,42	69,80	0,20	0,60	0,07	0,24	0,01	50,70
16	Q70	8,20	30,20	26,07	8,20	14,30	0,80	1,20	460,00	24,00	10,40	32,00	0,86	99,70	93,38	119,60	<LQ	0,10	0,01	<LQ	0,02	<LQ
16	Q71	7,08	21,40	26,34	8,05	32,00	0,88	1,20	45,00	349,00	28,80	33,00	0,50	129,60	66,93	119,60	0,30	0,60	0,04	<LQ	0,01	15,20
16	Q73	7,54	8,00	24,89	8,40	1,19	0,24	0,70	31,00	721,00	<LQ	17,00	1,20	89,70	27,01	179,40	0,06	0,02	<LQ	<LQ	0,03	<LQ
17	Q54	9,38	2,50	25,55	8,52	5,92	0,13	3,40	639,00	12,00	<LQ	<LQ	0,09	29,90	6,00	39,87	0,11	0,06	0,003	0,14	0,00	<LQ
17	Q68	9,65	28,40	22,24	8,49	21,50	0,05	2,20	633,00	16,00	55,20	110,00	1,55	209,33	103,00	189,39	0,05	0,35	0,043	0,20	0,05	<LQ
17	Q70	9,80	8,60	23,86	8,89	12,10	0,10	1,90	795,00	13,00	26,50	79,00	0,85	109,65	33,00	119,62	<LQ	0,10	0,012	<LQ	0,02	<LQ
17	Q73	10,35	14,70	22,82	8,32	1,13	0,22	0,60	744,00	10,00	<LQ	240,00	1,22	79,70	49,18	219,30	0,13	0,02	<LQ	<LQ	0,04	<LQ
18	Q54	8,24	5,60	27,25	7,72	7,65	0,26	0,50	52,00	<LQ	<LQ	A	0,42	19,90	8,00	42,86	0,21	<LQ	<LQ	0,20	0,01	<LQ
18	Q55	8,95	12,70	27,56	7,14	1,09	0,22	0,90	120,00	<LQ	<LQ	A	0,07	79,70	30,00	89,71	0,16	0,10	0,02	0,20	0,00	<LQ
18	Q68	9,44	37,30	25,74	8,45	35,30	0,27	2,00	1487,00	10,00	<LQ	1600,00	2,56	328,90	115,00	348,88	0,20	0,50	0,04	0,30	0,09	<LQ
18	Q69	10,69	14,10	23,02	7,86	A	0,91	7,10	85,00	147,00	<LQ	170,00	0,06	39,90	27,00	59,81	0,80	6,00	0,60	0,30	0,00	<LQ
18	Q70	10,07	36,50	26,60	8,30	6,29	0,03	1,30	521,00	<LQ	<LQ	140,00	0,97	119,60	93,00	139,55	0,05	0,04	0,01	0,20	0,03	<LQ
18	Q71	7,65	9,00	26,71	7,82	765,00	16,20	5,60	122,00	93,00	11,07	240,00	0,09	39,90	16,00	69,77	15,50	4,10	0,40	0,20	0,00	<LQ
18	Q72	6,62	49,40	27,85	7,62	A	14,70	10,70	147,00	212,00	<LQ	>1600	0,15	59,80	154,00	79,74	13,70	9,00	1,00	0,30	0,00	<LQ
18	Q73	10,04	15,40	25,35	7,85	A	<LQ	0,50	905,00	<LQ	<LQ	A	1,25	109,60	25,00	229,26	<LQ	<LQ	<LQ	0,20	0,04	<LQ
19	Q54	9,07	2,99	24,47	8,14	0,21	0,07	0,60	222,00	<LQ	16,50	A	0,07	29,90	8,00	29,90	<LQ	0,02	<LQ	0,50	0,00	<LQ
19	Q55	8,95	3,70	25,09	8,23	29,60	0,12	0,60	403,00	12,00	30,20	6,80	0,48	99,68	6,00	99,68	<LQ	0,29	0,02	0,20	0,01	<LQ
19	Q68	8,19	152,00	27,83	8,42	250,00	0,90	7,00	2592,00	15,00	691,50	1600,00	5,19	458,52	400,00	478,46	0,71	3,00	0,21	0,60	0,21	<LQ
19	Q70	8,64	14,00	24,73	8,45	5,88	<LQ	7,00	626,00	12,00	15,20	23,00	1,13	139,56	31,00	139,55	<LQ	0,06	0,01	0,60	0,03	<LQ
19	Q71	7,76	7,00	26,24	8,76	A	0,14	1,20	811,00	58,00	40,30	23,00	1,65	249,21	13,00	428,62	0,05	0,80	0,06	0,20	0,05	<LQ
19	Q73	9,17	11,76	23,78	7,79	0,55	0,16	0,60	876,00	<LQ	14,00	22,00	1,33	99,68	22,00	209,33	0,10	0,02	<LQ	0,08	0,04	<LQ
20	Q54	11,58	23,60	28,54	7,47	1,78	0,80	0,70	66,00	<LQ	17,30	<LQ	0,11	19,94	30,00	39,87	<LQ	0,03	<LQ	0,38	0,00	<LQ
20	Q55	9,57	18,40	28,85	7,83	30,20	0,77	0,76	99,00	16,00	<LQ	4,00	0,18	19,94	19,00	49,84	0,19	0,03	0,01	0,38	0,00	11,00

Campanha	Ponto	OD	DBO	Temp	pH	Turb	PT	NT	SDT	SST	Cl-a	Coli	CE	AT	DQO	DT	P-Orto	NO3	NO2	NH3	Sal	Feo-a
20	Q56	9,26	19,60	28,71	7,78	10,10	0,77	1,28	121,00	<LQ	<LQ	<LQ	0,25	69,78	31,00	69,78	0,07	0,38	<LQ	0,50	0,00	<LQ
20	Q68	5,04	51,30	26,12	7,77	33,40	0,94	1,80	414,00	<LQ	58,90	1,80	0,86	104,70	51,00	79,75	0,07	0,28	0,02	0,50	0,02	<LQ
20	Q70	11,37	21,20	25,93	7,72	3,72	0,85	1,60	508,00	4,00	6,20	90,00	0,99	109,70	37,00	89,71	<LQ	0,18	<LQ	0,60	0,03	10,30
20	Q71	8,78	21,20	29,11	7,98	49,50	0,88	1,30	880,00	12,00	17,60	220,00	1,56	628,00	29,00	249,20	0,14	0,30	0,02	0,90	0,05	20,60
20	Q73	8,43	15,60	27,27	7,78	2,80	<LQ	0,70	957,00	<LQ	8,00	<LQ	1,61	119,60	27,00	269,10	<LQ	0,03	<LQ	0,50	0,05	<LQ
21	Q54	9,79	9,70	28,11	9,03	0,54	0,17	0,90	52,00	<LQ	<LQ	>1600	0,09	119,60	14,00	39,87	<LQ	<LQ	<LQ	0,40	0,00	<LQ
21	Q55	9,55	9,80	26,86	8,88	17,90	0,17	0,90	156,00	<LQ	<LQ	27,00	0,23	69,78	15,00	89,39	0,14	0,06	0,01	0,30	0,00	<LQ
21	Q56	11,09	7,90	28,42	8,98	8,43	0,18	1,00	165,00	<LQ	<LQ	5,00	0,29	99,68	14,00	109,60	0,15	0,02	0,01	0,32	0,01	<LQ
21	Q68	6,86	64,20	26,10	8,18	25,10	0,36	1,01	606,00	19,00	23,90	140,00	1,25	249,20	120,00	179,40	<LQ	0,26	0,02	0,50	0,04	12,90
21	Q70	13,41	21,00	27,87	8,99	3,80	0,17	0,97	531,00	<LQ	<LQ	350,00	1,08	99,68	46,00	189,40	<LQ	0,08	0,01	0,60	0,03	<LQ
21	Q73	10,43	16,10	25,97	8,67	2,02	0,17	1,30	184,00	29,00	<LQ	4,00	1,84	109,70	34,00	309,00	<LQ	<LQ	<LQ	0,50	0,06	<LQ
22	Q54	10,09	3,80	28,81	7,89	1,61	0,18	<LQ	19,00	1749,00	<LQ	2,00	0,11	39,87	10,20	39,87	<LQ	0,02	<LQ	0,11	0,00	<LQ
22	Q55	7,50	4,80	28,05	7,70	12,10	0,18	<LQ	53,00	347,00	<LQ	<LQ	0,11	49,84	15,40	39,87	<LQ	0,14	<LQ	0,16	0,00	<LQ
22	Q56	9,04	4,50	27,05	7,80	10,20	0,17	<LQ	46,00	<LQ	<LQ	1,00	0,11	49,84	10,20	29,90	<LQ	0,08	<LQ	<LQ	0,00	<LQ
22	Q57	10,08	3,80	27,55	7,92	9,44	0,17	0,50	65,00	<LQ	<LQ	<LQ	0,11	39,87	13,00	39,87	<LQ	0,13	<LQ	0,36	0,00	<LQ
22	Q58	10,03	4,10	27,50	8,44	7,86	0,18	0,50	52,00	<LQ	<LQ	<LQ	0,11	39,87	14,30	39,87	<LQ	0,17	<LQ	0,39	0,00	<LQ
22	Q59	11,39	2,50	25,89	7,66	7,07	0,17	1,00	91,00	<LQ	5,90	2,00	0,12	29,90	8,10	29,90	<LQ	0,16	<LQ	0,34	0,00	<LQ
22	Q60	9,28	4,00	26,72	7,85	6,70	0,16	0,90	20,00	<LQ	<LQ	<LQ	0,12	49,84	10,80	39,87	<LQ	0,09	<LQ	0,40	0,00	<LQ
22	Q61	9,69	<LQ	28,90	7,72	7,93	0,19	1,10	97,00	<LQ	<LQ	2,00	0,13	39,87	6,40	39,87	<LQ	<LQ	<LQ	0,25	0,00	<LQ
22	Q62	9,69	<LQ	27,65	7,67	10,80	0,17	0,90	67,00	26,00	5,50	1,00	0,13	49,84	5,90	39,87	<LQ	<LQ	<LQ	0,28	0,00	<LQ
22	Q63	6,84	2,10	26,82	7,86	10,30	0,16	1,10	85,00	<LQ	<LQ	2,00	0,14	49,84	6,60	39,87	<LQ	<LQ	0,02	0,29	0,00	11,30
22	Q64	9,94	<LQ	27,24	7,54	14,20	0,15	0,80	75,20	<LQ	7,40	2,00	0,14	49,84	5,60	99,68	<LQ	<LQ	0,01	<LQ	0,00	<LQ
22	Q65	8,28	2,90	27,17	7,48	13,10	0,15	0,70	95,00	<LQ	5,80	<LQ	0,15	49,84	8,10	39,87	<LQ	0,15	0,01	<LQ	0,00	<LQ
22	Q66	7,46	<LQ	27,40	7,48	18,10	0,15	1,00	74,00	<LQ	6,30	<LQ	0,15	59,81	6,30	39,87	<LQ	0,03	0,01	<LQ	0,00	<LQ
22	Q68	9,94	<LQ	27,20	7,50	54,50	0,27	0,80	101,00	23,00	11,10	39,00	0,22	79,74	4,00	69,77	0,06	0,34	0,03	0,17	0,00	20,10
22	Q69	9,97	12,24	28,41	8,34	1,65	0,27	1,30	103,00	171,00	<LQ	350,00	0,22	79,74	22,00	69,77	0,08	0,70	0,08	0,18	0,00	16,80
22	Q70	9,33	<LQ	27,53	8,02	64,00	0,23	1,00	101,00	43,00	<LQ	5,50	0,24	79,74	<LQ	79,74	0,06	0,50	0,05	0,29	0,00	<LQ
22	Q71	9,65	10,88	25,91	7,71	155,00	0,24	1,10	134,00	76,00	13,20	430,00	0,27	89,71	17,00	89,71	0,06	0,80	0,08	0,14	0,01	<LQ
22	Q72	9,21	78,63	28,01	8,34	124,00	0,25	1,50	135,00	89,00	5,80	14,00	0,29	89,71	152,00	89,71	0,05	0,90	0,08	0,14	0,01	<LQ

Campanha	Ponto	OD	DBO	Temp	pH	Turb	PT	NT	SDT	SST	Cl-a	Coli	CE	AT	DQO	DT	P-Orto	NO3	NO2	NH3	Sal	Feo-a
22	Q73	7,35	72,51	26,14	8,28	9,79	<LQ	0,90	721,00	<LQ	9,80	920,00	1,46	119,60	168,00	209,30	<LQ	0,40	0,06	0,25	0,04	10,20
23	Q54	9,63	5,30	24,61	9,20	4,74	0,12	0,70	ND	<LQ	ND	<LQ	0,09	39,87	11,92	49,84	<LQ	0,02	0,00	0,30	0,00	<LQ
23	Q55	9,86	2,90	25,57	8,82	9,05	<LQ	0,60	31,00	<LQ	ND	<LQ	0,10	61,94	9,61	39,90	<LQ	0,03	0,01	0,25	0,00	ND
23	Q56	9,31	4,00	25,27	8,74	9,33	<LQ	0,60	<LQ	<LQ	ND	<LQ	0,10	82,59	10,34	29,90	<LQ	0,03	0,01	0,24	0,00	ND
23	Q57	8,65	6,00	25,05	9,19	13,70	<LQ	0,50	22,00	<LQ	ND	240,00	0,11	103,20	21,80	39,87	<LQ	0,03	0,02	0,24	0,00	ND
23	Q58	9,02	4,40	24,87	8,79	10,50	<LQ	0,60	<LQ	<LQ	<LQ	240,00	0,11	103,20	11,22	39,87	<LQ	0,05	0,02	0,23	0,00	ND
23	Q59	8,96	3,20	26,49	8,44	7,54	0,15	0,70	25,00	<LQ	<LQ	10,00	0,11	39,87	8,61	49,84	<LQ	0,10	0,01	0,38	0,00	<LQ
23	Q60	8,35	2,40	27,22	8,28	7,22	0,15	0,60	46,00	<LQ	<LQ	8,00	0,11	39,87	6,42	49,84	<LQ	0,02	0,01	0,37	0,00	<LQ
23	Q61	9,20	4,10	26,84	8,22	8,78	0,17	0,70	39,00	<LQ	<LQ	23,00	0,12	19,84	9,86	49,84	0,10	0,02	0,01	0,34	0,00	<LQ
23	Q62	9,90	3,60	27,38	9,04	8,40	0,15	0,70	52,00	<LQ	<LQ	23,00	0,12	29,90	10,04	49,84	0,10	0,05	0,01	0,40	0,00	<LQ
23	Q63	6,67	3,90	29,99	9,40	13,30	0,19	0,60	49,00	<LQ	<LQ	23,00	0,13	39,87	10,12	49,84	0,10	0,05	0,01	0,38	0,00	<LQ
23	Q64	7,83	12,70	26,91	9,24	13,90	0,15	0,70	<LQ	<LQ	<LQ	170,00	0,13	49,84	27,17	49,84	0,10	0,07	0,04	0,40	0,00	<LQ
23	Q65	9,03	3,20	26,77	8,90	12,10	0,16	0,60	54,00	<LQ	<LQ	>1600	0,13	39,87	9,96	59,80	0,10	0,06	0,01	0,37	0,00	<LQ
23	Q66	8,48	2,80	27,11	8,73	13,50	0,18	0,80	57,00	<LQ	<LQ	>1600	0,14	39,87	8,79	49,84	0,10	0,09	0,01	0,40	0,00	<LQ
23	Q68	6,77	3,90	24,93	8,09	52,10	0,20	0,60	68,00	<LQ	7,90	240,00	0,18	59,81	10,70	49,84	<LQ	0,29	0,03	0,30	0,00	<LQ
23	Q69	9,13	3,80	27,10	8,31	89,50	0,20	0,80	<LQ	13,00	<LQ	540,00	0,18	49,84	8,60	59,81	0,10	0,43	0,05	0,20	0,00	<LQ
23	Q70	6,62	36,10	26,63	8,75	45,30	0,17	0,70	<LQ	20,00	<LQ	240,00	0,17	59,81	106,70	59,81	0,10	0,41	0,03	0,20	0,00	<LQ
23	Q71	10,06	4,90	25,43	8,06	39,10	0,18	0,90	<LQ	<LQ	<LQ	>1600	0,18	59,81	10,30	79,74	0,10	0,32	0,02	0,40	0,00	<LQ
23	Q72	8,82	3,40	27,84	8,67	29,73	0,16	0,60	<LQ	<LQ	<LQ	>1600	0,19	59,81	9,00	69,78	0,10	0,21	0,02	0,20	0,00	<LQ
23	Q73	8,34	27,20	25,75	7,94	7,50	0,18	0,60	37,10	<LQ	<LQ	11,00	0,75	59,81	73,22	149,50	<LQ	0,12	0,03	0,40	0,02	<LQ
24	Q54	9,67	A	29,38	7,81	2,54	A	A	A	A	A	A	0,01	A	A	A	A	A	A	A	0,00	A
24	Q55	9,80	<LQ	25,94	7,75	2,02	<LQ	0,67	55,00	<LQ	<LQ	34,00	0,12	40,00	5,00	19,36	<LQ	<LQ	0,02	0,09	0,00	<LQ
24	Q56	9,73	<LQ	25,57	7,21	2,92	<LQ	0,84	74,00	<LQ	<LQ	8,00	0,13	50,00	5,00	19,36	<LQ	0,06	0,01	0,10	0,00	<LQ
24	Q57	9,87	3,50	25,10	7,38	8,00	<LQ	1,04	61,00	<LQ	<LQ	17,00	0,13	50,00	11,00	29,90	<LQ	0,04	0,01	0,11	0,00	<LQ
24	Q58	11,04	3,40	25,22	7,47	4,48	<LQ	0,76	68,00	<LQ	<LQ	27,00	0,15	60,00	9,00	49,84	<LQ	0,07	0,01	0,03	0,00	<LQ
24	Q59	11,04	<LQ	26,43	7,60	3,67	0,12	0,58	<LQ	99,00	<LQ	250,00	0,15	50,00	7,00	29,90	0,10	0,13	0,07	0,07	0,00	7,90
24	Q60	10,61	<LQ	25,64	7,93	2,23	0,11	<LQ	85,00	<LQ	<LQ	>1600,00	0,17	60,00	7,00	49,84	0,10	0,06	0,03	0,20	0,00	9,02
24	Q61	11,79	3,60	25,20	8,21	5,77	0,11	0,79	91,00	<LQ	<LQ	>1600,00	0,19	60,00	14,00	59,80	0,10	0,06	0,05	0,10	0,00	48,13
24	Q62	12,64	21,10	25,84	8,81	6,19	0,13	0,69	89,00	11,00	<LQ	>1600,00	0,20	70,00	27,00	49,84	<LQ	0,20	0,13	0,10	0,00	51,28

Campanha	Ponto	OD	DBO	Temp	pH	Turb	PT	NT	SDT	SST	Cl-a	Coli	CE	AT	DQO	DT	P-Orto	NO3	NO2	NH3	Sal	Feo-a
24	Q63	12,31	12,60	27,11	8,51	6,95	0,13	1,14	95,00	<LQ	<LQ	>1600,00	0,20	60,00	30,00	49,84	0,10	0,23	0,20	0,12	0,00	62,70
24	Q64	10,76	10,10	25,49	8,53	5,71	0,11	1,26	99,00	18,00	<LQ	120,00	0,20	60,00	25,00	49,84	0,10	0,17	0,14	0,12	0,00	63,20
24	Q65	9,82	2,80	25,12	7,48	4,28	0,17	0,51	78,00	<LQ	<LQ	94,00	0,17	50,00	7,00	49,84	0,10	0,15	0,10	0,12	0,00	16,54
24	Q66	9,92	4,20	25,53	7,96	6,01	0,11	0,82	82,00	<LQ	<LQ	920,00	0,18	60,00	10,00	39,87	<LQ	0,10	0,07	0,07	0,00	11,69
24	Q68	8,09	<LQ	23,39	7,92	216,00	<LQ	2,07	445,00	84,00	16,36	>1600,00	0,66	100,00	40,00	129,60	<LQ	1,60	0,11	0,09	0,02	13,29
24	Q70	9,29	5,60	26,92	8,44	6,70	ND	0,85	172,00	<LQ	<LQ	>1600,00	0,33	80,00	15,00	19,93	<LQ	0,16	<LQ	0,13	0,01	16,46
24	Q73	10,60	20,50	26,64	8,12	6,49	<LQ	0,62	185,00	<LQ	<LQ	1600,00	0,38	110,00	23,00	89,71	<LQ	0,03	<LQ	0,19	0,01	37,60
25	Q54	7,69	<LQ	27,42	7,23	5,15	<LQ	<LQ	72,00	<LQ	9,46	210,00	0,13	39,87	3,40	59,80	<LQ	0,02	0,002	0,14	0,00	<LQ
25	Q55	7,63	<LQ	30,18	8,62	4,67	0,11	<LQ	53,00	<LQ	<LQ	8,00	0,13	39,87	11,80	59,80	<LQ	0,03	0,008	0,14	0,00	<LQ
25	Q56	8,82	<LQ	29,04	8,30	6,81	0,11	<LQ	61,00	<LQ	<LQ	5,00	0,14	39,87	9,94	39,87	<LQ	0,03	0,006	0,17	0,00	<LQ
25	Q57	8,87	4,80	29,95	8,72	27,80	0,12	0,69	63,00	27,00	<LQ	79,00	0,15	39,87	7,00	99,68	<LQ	0,16	0,015	0,18	0,00	<LQ
25	Q58	8,43	<LQ	28,12	8,16	16,40	0,11	<LQ	72,00	12,00	<LQ	32,00	0,14	39,87	<LQ	99,68	<LQ	0,12	0,018	0,20	0,00	<LQ
25	Q59	8,94	11,20	29,70	8,06	9,08	<LQ	<LQ	60,00	<LQ	11,22	2,00	0,14	39,87	26,00	79,74	<LQ	0,03	0,008	0,20	0,00	48,22
25	Q60	8,93	8,00	30,18	8,12	4,16	<LQ	0,55	52,00	<LQ	8,02	7,00	0,14	39,87	21,00	79,74	<LQ	0,06	0,002	0,22	0,00	30,11
25	Q61	9,45	9,00	29,38	8,25	4,86	<LQ	1,13	50,00	<LQ	<LQ	14,00	0,15	49,84	22,00	59,80	<LQ	0,03	0,004	0,27	0,00	43,89
25	Q62	8,47	8,90	28,04	7,84	10,20	<LQ	0,87	56,00	<LQ	12,83	5,00	0,15	39,87	15,00	79,74	<LQ	0,05	0,006	0,22	0,00	52,22
25	Q63	9,04	6,00	30,97	8,53	8,95	<LQ	0,77	86,00	<LQ	11,22	1,00	0,18	59,80	20,00	99,68	<LQ	0,06	0,005	0,19	0,00	68,41
25	Q64	10,57	16,30	30,16	9,50	9,72	0,11	0,67	94,00	<LQ	<LQ	7,00	0,19	19,95	26,00	79,94	<LQ	0,09	0,008	0,17	0,00	19,77
25	Q65	7,26	22,70	28,85	7,82	4,87	<LQ	0,77	84,00	<LQ	<LQ	<LQ	0,21	59,80	32,00	99,68	<LQ	<LQ	0,003	0,18	0,00	<LQ
25	Q66	8,15	22,60	28,04	8,01	8,65	<LQ	0,83	93,00	<LQ	<LQ	1,00	0,21	49,84	34,00	99,68	<LQ	<LQ	0,004	0,18	0,00	<LQ
25	Q68	5,30	20,10	26,72	7,65	24,40	0,16	0,96	151,00	13,00	46,83	110,00	0,39	99,68	29,00	219,30	<LQ	0,11	0,011	0,17	0,01	<LQ
25	Q69	8,06	20,80	26,87	7,87	38,90	0,16	0,85	141,00	18,00	<LQ	240,00	0,39	89,71	25,90	173,40	<LQ	0,16	0,016	0,16	0,01	31,84
25	Q70	6,80	7,60	28,71	7,43	31,10	0,12	1,09	142,00	20,00	<LQ	8,00	0,39	99,68	23,80	199,40	<LQ	0,08	0,007	0,17	0,01	18,75
25	Q71	8,48	2,70	27,66	7,80	163,00	0,13	0,96	167,00	61,00	<LQ	540,00	0,37	89,71	17,40	179,40	0,10	0,32	0,010	0,28	0,01	<LQ
25	Q72	8,54	<LQ	29,73	7,81	408,00	0,20	0,92	238,00	149,00	<LQ	1600,00	0,31	89,71	12,60	179,40	0,13	0,50	0,022	0,17	0,01	<LQ
25	Q73	6,53	5,20	26,90	7,86	10,50	<LQ	0,89	192,00	23,00	<LQ	1,00	0,43	109,60	17,80	239,20	<LQ	0,03	0,004	0,09	0,01	42,87

Legenda: A = Parâmetro ausente; <LQ = Abaixo do limite de detecção. Fonte: Ministério do Desenvolvimento Regional, 2019.

Obs: os resultados destacados em vermelho correspondem às violações dos padrões recomendados pela resolução CONAMA 357/2005.

ANEXO B - LICENÇA PRÉVIA Nº 200/2005

SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE
INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS

LICENÇA PRÉVIA nº 200/2005

O PRESIDENTE DO INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS - IBAMA, no uso de suas atribuições que lhe conferem o art. 24 Anexo I ao Decreto 4.756, de 20 de junho de 2003, que aprovou a Estrutura Regimental do IBAMA, publicado no D.O.U. de 23 de junho de 2003, e artigo 8º do Regimento interno aprovado pela Portaria GM/MMA nº 230, de 14 de maio de 2002, publicada no D.O.U., de 21 de junho de 2003, **RESOLVE:**

Expedir a presente Licença Prévia ao:

EMPREENDEDOR: Ministério da Integração Nacional – MI
CNPJ: 03.353.358/0001-96
ENDEREÇO: Esplanada dos Ministérios - Bloco "E"
CEP: 70062-900 **CIDADE:** Brasília **UF:** DF
TELEFONE: (61) 414-5768 **FAX:** (61) 321-3122
REGISTRO NO IBAMA: Processo nº 02001.003718/94-54

relativa ao Projeto de Integração do Rio São Francisco com as Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional, empreendimento de infra-estrutura hídrica de inserção regional (atingindo territórios dos Estados de Pernambuco, Paraíba, Rio Grande do Norte e Ceará), em consonância com a Resolução nº 029/2005 da Agência Nacional de Águas, que dispõe sobre a outorga preventiva.

É constituído por estações de captação e de bombeamento de água, canais revestidos de concreto armado e em leito natural, aquedutos, túneis, além de 26 reservatórios intermediários (dos quais 3 existentes). Tais estruturas dispõem-se em dois sistemas independentes, denominados eixos Norte e Leste, que se estendem por cerca de 720 km de comprimento, estando dimensionados para transpor um volume máximo de 127 m³/s (99 m³/s – eixo Norte e 28 m³/s – eixo Leste). No eixo norte, a captação está prevista para ocorrer no município de Cabrobó/PE, a jusante do reservatório de Sobradinho e imediatamente a montante da ilha Assunção. No eixo Leste, a captação está prevista para o município de Petrolândia/PE, no reservatório da UHE Itaparica.

Esta Licença Prévia é válida pelo período de 01 (um) ano, a contar da presente data, estando sua validade condicionada ao cumprimento das condicionantes constantes no verso deste documento, que deverão ser atendidas dentro dos respectivos prazos estabelecidos, e dos demais anexos constantes do processo que, embora não transcritos, são partes integrantes deste documento.

Brasília, DF **29 ABR 2005**

MARCUS LUIZ BARROSO BARROS
Presidente do IBAMA

CONDIÇÕES DE VALIDADE DA LICENÇA PRÉVIA nº 200/2005

1. Condicionantes Gerais:

- 1.1. A concessão desta Licença Prévia deverá ser publicada em conformidade com a Resolução nº 006/86 do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA, e cópias das publicações deverão ser encaminhadas ao IBAMA.
- 1.2. Quaisquer alterações no empreendimento deverão ser precedidas de anuência do IBAMA.
- 1.3. A renovação desta Licença Prévia deverá ser requerida em conformidade com a Resolução CONAMA nº 237/97.
- 1.4. O IBAMA, mediante decisão motivada, poderá modificar as condicionantes e as medidas de controle e adequação, suspender ou cancelar esta licença, caso ocorra:
 - violação ou inadequação de quaisquer condicionantes ou normas legais;
 - omissão ou falsa descrição de informações relevantes que subsidiaram a expedição da licença;
 - graves riscos ambientais e de saúde.
- 1.5. Perante o IBAMA, o Ministério da Integração Nacional - MI é o único responsável pela implementação dos Planos, Programas e Medidas Mitigadoras.
- 1.6. Esta licença não autoriza a instalação do empreendimento.

2. Condicionantes Específicas:

- 2.1. Apresentar Outorga de Direitos de Uso de Recursos Hídricos, que comprove:
 - I – a sustentabilidade do arranjo institucional e administrativo, com a definição de atribuições e competências para a gestão da transposição;*
 - II – a viabilidade financeira do empreendimento, em particular a compatibilidade dos custos de operação e manutenção com as receitas auferidas na cobrança pelo uso da água; e*
 - III – a viabilidade técnica e operacional do empreendimento considerando as estações de bombeamento, os canais, as adutoras e o controle das derivações.*
- 2.2. Apresentar Certificado de Avaliação da Sustentabilidade da Obra – CERTOH, atestando a sustentabilidade:
 - I – operacional da infra-estrutura, caracterizada pela existência de mecanismo institucional que garanta a continuidade da operação da obra de infra-estrutura hídrica; e*
 - II – hídrica, caracterizada pela demonstração de que a implantação da obra de infraestrutura hídrica contribui para o aumento do nível de aproveitamento hídrico da respectiva bacia hidrográfica.*
- 2.3. Detalhar, no PBA – Projeto Básico Ambiental, todos os programas ambientais propostos, apresentando metodologia, responsável técnico e cronograma físico de implantação.
- 2.4. Acrescer, no PBA, os programas ambientais propostos pelo IBAMA:
 - Programa de Monitoramento de Sistema Adutor, o qual deverá contemplar as medições das vazões nos pontos de captação, entrega e derivações do canal adutor, e do nível do reservatório de Sobradinho, objetivando a otimização da operação do sistema adutor e corroborando com o atendimento da vazão mínima de 1300 m³/s na foz do rio São Francisco, definida pelo Plano Decenal de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco;
 - Programa de Cadastramento de Fontes Hídricas Subterrâneas, o qual deverá contemplar os aquíferos locados em áreas potenciais e passíveis de acompanhamento, visando monitoramento dos mesmos, na área de influência direta do empreendimento;
 - Programa de Monitoramento de Processos Erosivos, o qual deverá contemplar o monitoramento das encostas marginais, canais, leitos naturais, áreas de empréstimo, botas-fora e acessos à obra, detalhando as áreas propensas à incidência de erosão e propondo ações de prevenção e recomposição;
 - Programa de Monitoramento das Cargas Sólidas aportantes nos rios receptores e seus açudes principais, de caráter permanente, para acompanhamento dos efeitos decorrentes dos processos de erosão da bacia de drenagem, levando em conta a taxa de sedimentação e assoreamento;

CONTINUAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE VALIDADE DA LICENÇA PRÉVIA nº 200/2005

- Programa de Apoio às Ações de Vigilância da Qualidade da Água para o Consumo Humano;
 - Programa de Apoio a Redução de Perdas no Sistema de Abastecimento Público e Estimulo ao Reuso da Água, nas bacias receptoras;
 - Programa de Apoio ao Saneamento Básico, no qual deverão estar incluídos os municípios que sofrerão pressão sobre a infra-estrutura urbana, os que receberão água para abastecimento e os que despejam efluentes *in natura* nas bacias hidrográficas receptoras;
 - Programa de Apoio ao Desenvolvimento de Projetos implantados, em implantação ou planejados nas bacias receptoras, tais como, construção de adutoras e canais que servem para conduzir a água dos açudes aos usuários finais, objetivando maior eficiência do empreendimento;
 - Programa de Segurança e Alerta quanto às oscilações das vazões dos canais naturais que irão receber as águas transpostas, identificando as seções fluviais mais vulneráveis à ocorrência de variações bruscas e monitorando os transientes hidráulicos, respeitando as restrições nas áreas ribeirinhas, evitando acidentes com a população e animais;
 - Programa de Relocação das Infra-estruturas a serem afetadas pela implantação do empreendimento;
 - Programa de Acompanhamento da Situação dos Processos Minerários, na ADA;
 - Programa de Monitoramento da Cunha Salina, visando o acompanhamento da dinâmica da salinidade na foz do rio São Francisco.
- 2.5 Incluir, no Programa de Desenvolvimento das Comunidades Indígenas, a realização de estudos etnoecológicos das comunidades impactadas pelo projeto, visando potencializar os benefícios operacionais do empreendimento e o atendimento de necessidades.
- 2.6 Fazer gestão junto a FUNAI, visando a demarcação da Terra Indígena dos Pipipan, no município de Floresta.
- 2.7 Reformular o Programa de Educação Ambiental, de acordo com o Parecer nº 029/04 - CGEAM/DIGET/IBAMA, e incluir o Subprograma de Educação em Saúde e Boas Práticas Intradomiciliares.
- 2.8 Confirmar, por meio de novos estudos, a eventual existência de comunidades quilombolas, na AID do projeto, em Pernambuco, e elaborar programa de apoio a essas comunidades, caso seja comprovada a presença.
- 2.9 Mapear e propor zoneamento da área de 2,5 km nas margens dos canais, declarada de utilidade pública e de interesse social pelo Decreto Federal de 19 de maio de 2004, indicando as áreas apropriadas para reassentamento e reforma agrária.
- 2.10 Realizar o projeto de levantamento e prospecção arqueológica e a identificação de áreas de interesse cultural na AID, de acordo com o Ofício nº 199/04 - GEPAN/DEPAM/IPHAN.
- 2.11 Incluir, no Programa de Apoio Técnico às Prefeituras, o Subprograma de Apoio a Elaboração de Planos Diretores Municipais, de acordo com o preceito do § 1º do Art. 4º da Lei nº 10.257/2001, que instituiu o Estatuto da Cidade.
- 2.12 Apresentar, no Programa de Implantação de Infra-Estrutura de Abastecimento de Água às Populações ao Longo dos Canais, proposta para viabilizar o tratamento de toda água fornecida coletivamente, compatível ao atendimento dos padrões de potabilidade estabelecidos pela Portaria MS nº 518/2004.
- 2.13 Detalhar a proposta de construção de passagens de pedestres e veículos ao longo dos canais, descrevendo quantidade, localização justificada e projeto executivo.
- 2.14 Detalhar as características geológico/geotécnicas dos eixos das barragens projetadas e dos locais onde se prevê a construção de túneis.
- 2.15 Apresentar plano de manutenção dos canais naturais e artificiais desde os pontos de captação até os portais de entrega.
- 2.16 Reavaliar o potencial energético para as Pequenas Centrais Hidrelétricas propostas, tendo em vista as regras de bombeamento apresentadas pela Agência Nacional de Águas.
- 2.17 Elaborar modelo matemático prognóstico da qualidade da água nos reservatórios a serem construídos e demais corpos d'água que sofrerão alterações decorrentes da operação do empreendimento.

CONTINUAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE VALIDADE DA LICENÇA PRÉVIA nº 200/2005

- 2.18 Incluir, no Programa de Monitoramento de Qualidade de Água e Limnologia, novos pontos de amostragem em todos os reservatórios, existentes ou a serem construídos, que se integrem ao projeto, e monitoramento de cianotoxinas, quando a densidade de cianobactérias for superior a 20.000 cel/mL, nos pontos de captação de água para abastecimento público, e 50.000 cel/mL nas áreas de recreação de contato primário e dessedentação de animais.
- 2.19 Realizar avaliação da salinidade em todos os açudes contemplados pelo projeto e elaborar prognóstico do processo de salinização das águas, em função do aumento da oferta hídrica e da expansão das atividades agropecuárias.
- 2.20 Apresentar, no Programa de Apoio ao Desenvolvimento de Atividades de Piscicultura, metodologia de estudo da capacidade suporte dos reservatórios atuais e futuros, para povoamento dos reservatórios e implantação de tanques-rede, considerando as espécies cultiváveis, as taxas de conversão alimentar, os riscos de eutrofização e introdução de substâncias potencialmente nocivas. Na AID correspondente à bacia do rio São Francisco deverá ser incentivado o uso de espécies nativas.
- 2.21 Detalhar os mecanismos propostos para mitigação da modificação e depleção das comunidades biológicas aquáticas nativas das bacias receptoras.
- 2.22 Apresentar proposta de implantação da medida recomendada pelo estudo "proteção de riachos onde ainda ocorrem elementos da fauna aquática endêmica das bacias receptoras", com a identificação destes riachos e programa para proteção dos mesmos.
- 2.23 No âmbito do Programa de Conservação e Uso do Entorno e das Águas dos Reservatórios, apoiar os órgãos responsáveis na implementação do enquadramento, como instrumento de planejamento e gestão da qualidade da água nas bacias receptoras, conforme Resoluções CNRH nº 12/2000 e CONAMA nº 357/2005.
- 2.24 Incorporar no Subprograma de Monitoramento das Modificações na Cobertura Vegetal, novos levantamentos florísticos e fitossociológicos, com maior intensidade amostral, caracterização das espécies presentes, grau de conservação dos fragmentos, apresentando curva espécie-área para cada parcela, contemplando a AID do empreendimento e áreas propostas para expansão agrícola.
- 2.25 Realizar inventário florestal, conforme cronograma de implantação da obra, estimando-se a intensidade amostral necessária para garantir erro de amostragem máximo de 20% para nível de significância de no mínimo 90%. Contemplar as áreas de desmate obrigatório e as áreas que podem ser mantidas como refúgio para ictiofauna, dentro dos futuros reservatórios, apresentando os critérios técnicos que conduziram a essa divisão.
- 2.26 Apresentar mapas de vegetação, confrontando as áreas propícias à expansão agrícola com as áreas consideradas prioritárias para conservação pelo PROBIO, as Unidades de Conservação propostas no estudo e as já existentes.
- 2.27 Detalhar, no Programa de Compensação Ambiental, o diagnóstico das Unidades de Conservação existentes – incluir a ESEC Castanhão e PARNA Catimbau – e o mapeamento das áreas propostas para criação de novas unidades, a fim de subsidiar a análise deste Instituto.
- 2.28 Monitorar o incremento das atividades de carcinicultura nas bacias receptoras e propor medidas de controle e ações de norteamo dessa atividade, visando compatibilizá-la com as políticas de conservação e proteção ambiental.
- 2.29 Apresentar proposta de implementação das medidas recomendadas no estudo, com o objetivo de mitigar os impactos à fauna local: "minimização da destruição de áreas com Caatinga bem conservada"; "implantação de cercas ao longo dos canais associadas a pontos de passagem sobre os mesmos"; e "colocação de guaritas com guardas nos limites das áreas priorizadas".
- 2.30 Detalhar a proposta de construção de passagens para a fauna ao longo dos trechos com vegetação preservada, descrevendo quantidade, localização justificada e projeto executivo.
- 2.31 Formalizar Termo de Compromisso com a Câmara Técnica de Compensação Ambiental.

ANEXO C - LICENÇA DE OPERAÇÃO Nº 1464/2018



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
 MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE
 INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS – IBAMA

LICENÇA DE OPERAÇÃO Nº 1464/2018

A PRESIDENTE DO INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS – IBAMA, nomeada por Decreto de 02 de junho de 2016, publicado no Diário Oficial da União de 03 de junho de 2016, no uso das atribuições que lhe conferem o art. 22º, parágrafo único, inciso V do Decreto nº 6.099, de 26 de abril de 2007, que aprovou a Estrutura Regimental do IBAMA, publicado no Diário Oficial da União de 27 de abril de 2007; **RESOLVE:**

Expedir a presente Licença de Operação à:

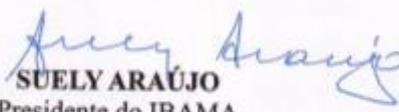
EMPRESA: MI – Ministério da Integração
CNPJ: 03.353.358/0001-96
CTF: 89195
ENDEREÇO: SGAN Quadra 906 Norte Bloco “A” Edifício Celso Furtado
CEP: 70790-060 **CIDADE:** Brasília **UF:** DF
TELEFONE: (61) 3414-5564/5828/5568
PROCESSO IBAMA: Nº 02001.003718/94-54

Referente ao Eixo Leste do Projeto de Integração do Rio São Francisco com as Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional - PISF. Empreendimento de infraestrutura hídrica de inserção regional atingindo os municípios Floresta (PE), Custódia(PE), Betânia (PE), Sertânia (PE) e Monteiro (PB).

O Eixo Leste do PISF possui 217 km de extensão e é composto por estações de captação e bombeamento de água, canais revestidos de concreto armado e em leito natural, aquedutos, túneis, reservatórios intermediários e linhas de transmissão. A captação de água está localizada no município de Petrolândia no reservatório da UHE Luiz Gonzaga. A linha de transmissão tem 158 km de extensão, sendo constituída por cinco seguimentos, incorporando as subestações SE Seccionadora-E0/SE-E1/SE-E2/SE-E3/SE-E4/SE-E5.

Esta Licença de Operação é válida por 10 (dez) anos, a partir da data da assinatura, observadas as condições discriminadas neste documento e nos demais anexos constantes do processo que, embora não transcritos, são partes integrantes desta Licença.

Brasília-DF, 11 OUT 2018


SUELY ARAÚJO
 Presidente do IBAMA

CONDIÇÕES DE VALIDADE DA LICENÇA DE OPERAÇÃO Nº 1464/2018**1. CONDIÇÕES GERAIS**

- 1.1. Esta Licença deverá ser publicada conforme Resolução nº 06/86 do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, e as cópias das publicações deverão ser encaminhadas ao Ibama;
- 1.2. O Ibama, mediante decisão motivada, poderá modificar as condicionantes e as medidas de controle e adequação, suspender ou cancelar esta licença, caso ocorra;
 - a) Violação ou inadequação de quaisquer condicionantes ou normas legais;
 - b) Omissão ou falsa descrição de informações relevantes que subsidiaram a expedição da licença;
 - c) Superveniência de graves riscos ambientais e de saúde.
- 1.3. Qualquer alteração nas especificações do projeto deverá ser precedida de anuência do Ibama;
- 1.4. O Ibama deverá ser comunicado, imediatamente, em caso de ocorrência de qualquer acidente que cause ou possa causar dano ambiental;
- 1.5. A Renovação da Licença de Operação deverá ser requerida até 120 (cento e vinte) dias antes do término da validade desta Licença;

2. CONDIÇÕES ESPECÍFICAS

- 2.1. Executar os Seguintes Planos e Programas Ambientais:
 - 2.1.1. Plano de Gestão, Controle Ambiental e Social das Obras;
 - 2.1.2. Plano Ambiental de Construção (PAC);
 - 2.1.3. Programa de Comunicação Social;
 - 2.1.4. Programa de Educação Ambiental;
 - 2.1.5. Programa de Treinamento e Capacitação de Técnicos da Obra em Questões Ambientais;
 - 2.1.6. Programa de Identificação e Salvamento de Bens Arqueológicos;
 - 2.1.7. Programa de Indenização de Terras e Benfeitorias;
 - 2.1.8. Programa de Reassentamento de Populações;
 - 2.1.9. Programa de Recuperação de Áreas Degradadas;
 - 2.1.10. Programa de Supressão de Vegetação das Áreas de Obra e Limpeza dos Reservatórios;
 - 2.1.11. Programa de Desenvolvimento das Comunidades Indígenas;
 - 2.1.12. Programa de Compensação Ambiental;
 - 2.1.13. Programa de Conservação e Uso do Entorno e das Águas dos Reservatórios;
 - 2.1.14. Programa de Implantação de Infra-Estrutura de Abastecimento de Água;



CONDIÇÕES DE VALIDADE DA LICENÇA DE OPERAÇÃO Nº 1464/2018
(Continuação)

- 2.1.1. Programa de Fornecimento de Água e Apoio Técnico para Pequenas Atividades de Irrigação;
- 2.1.2. Programa de Desenvolvimento das Comunidades Quilombolas;
- 2.1.3. Programa de Regularização Fundiária as Áreas do Entorno dos Canais;
- 2.1.4. Programa de Monitoramento de Vetores e Hospedeiros de Doenças;
- 2.1.5. Programa de Monitoramento da Qualidade da Água e Limnologia;
- 2.1.6. Programa de Conservação da Fauna e da Flora;
- 2.1.7. Programa de Monitoramento de Sistema Adutor;
- 2.1.8. Programa de Cadastramento de Fontes Hídricas Subterrâneas;
- 2.1.9. Programa de Monitoramento de Processos Erosivos;
- 2.1.10. Programa de Monitoramento de Cargas Sólidas Aportantes nos Rios Receptores e Seus Açudes Principais;
- 2.1.11. Programa de Apoio ao Saneamento Básico;
- 2.1.12. Programa de Relocação das Infra-Estruturas a Serem Afetadas pela Implantação do Empreendimento;
- 2.1.13. Programa de Acompanhamento da Situação dos Processos Minerários na ADA;
- 2.1.14. Programa de Corte e Poda Seletiva da Vegetação (Linha de Transmissão);
- 2.1.15. Programa de Monitoramento, Prevenção e Controle de Incêndios Florestais na Faixa de Servidão (Linha de Transmissão);
- 2.2. Executar o Programa de Desenvolvimento das Comunidades Quilombolas, conforme disposto no Ofício nº 88/2017-GAB-FCP e o Parecer Técnico nº 02/2017-DPA-FCP, da Fundação Cultural Palmares.
- 2.3. Executar o Programa de Identificação e Salvamento de Bens Arqueológicos, conforme disposto nos Ofícios nº 302 (SEI 0593710) e 303/2017 - CNA/DEPAM/IPHAN (SEI 0869543), do Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional – IPHAN.
- 2.4. Executar o Programa de Desenvolvimento das Comunidades Indígenas conforme disposto no Ofício nº 304/2017/CGLIC/DPDS-FUNAI (SEI 1052453) da Fundação Nacional do Índio e seus anexos, Informações Técnicas 03/2017/ COEP/CGLIC/DPDS-FUNAI e 59/2017/COEP/CGLIC/DPDS-FUNAI.
- 2.5. No Programa de Fornecimento de Água e Apoio Técnico para Pequenas Atividades de Irrigação, deverá realizar ações de monitoramento e assistência técnica por no mínimo 5 anos, após a entrega dos sistemas de irrigação.
- 2.6. Entregar anualmente ao Ibama o Relatório de Monitoramento Ambiental referente ao cumprimento das condicionantes desta Licença de Operação e a execução dos Programas Ambientais, contendo minimamente: introdução; metodologia aplicada na execução do plano, programa ou medida ambiental; sistematização dos dados na forma de planilhas; representações gráficas; ilustrações por meio de mapas e fotos; discussão aprofundada dos resultados; conclusões; e propostas de melhorias.

