

**ESTUDO DA QUALIDADE DA ÁGUA EM DOIS
RESERVATÓRIOS DE PCHs EM CASCATA: EFEITOS
CUMULATIVOS E EFICIÊNCIA DE ÍNDICES DE
QUALIDADE AMBIENTAL**

William Flores Broock

Florianópolis, 2021



William Flores Broock

**ESTUDO DA QUALIDADE DA ÁGUA EM DOIS RESERVATÓRIOS DE PCHs EM
CASCATA: EFEITOS CUMULATIVOS E EFICIÊNCIA DE ÍNDICES DE QUALIDADE
AMBIENTAL**

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental do Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo de Almeida Mohedano

Florianópolis,

2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Flores, William

ESTUDO DA QUALIDADE DA ÁGUA EM DOIS RESERVATÓRIOS DE
PCHs EM CASCATA: : EFEITOS CUMULATIVOS E EFICIÊNCIA DE
ÍNDICES DE QUALIDADE AMBIENTAL / William Flores ;
orientador, Rodrigo Mohedano, 2021.

123 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,
Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental,
Florianópolis, 2021.

Inclui referências.

1. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2. Empreendimentos
Hidrelétricos em cascata. 3. Índices de Qualidade
Ambiental. 4. Qualidade da Água. 5. Reservatório
Artificial. I. Mohedano, Rodrigo. II. Universidade Federal
de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Sanitária e
Ambiental. III. Título.

William Flores Broock

**ESTUDO DA QUALIDADE DA ÁGUA EM DOIS RESERVATÓRIOS DE PCHs EM
CASCATA: EFEITOS CUMULATIVOS E EFICIÊNCIA DE ÍNDICES DE
QUALIDADE AMBIENTAL**

Este trabalho de conclusão de curso foi julgado adequado para obtenção de Título de Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental

Florianópolis, 17 de setembro de 2021

Prof^a. Maria Elisa Magri, Dr^a.
(Coordenadora do Curso)

Prof. Rodrigo de Almeida Mohedano, Dr.
(Orientador)

Banca Examinadora

Prof^a. Patrícia Kazue Uda, Dr^a.
(Membro interno)

Prof. Nelson Libardi, Dr.
(Membro interno)

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos,

À minha companheira Aline, a qual ao longo desta jornada sempre demonstrou seu amor e apoio. Por me passar confiança e sempre acreditar em mim, você é meu porto seguro para qualquer ocasião e esta conquista também é sua.

A meus pais Walter e Carla, os quais sempre buscaram proporcionar os melhores momentos possíveis, sem os ensinamentos, valores e o amor de vocês não teria chegado até aqui. Às minhas irmãs Cristina e Clara, agradeço por todo apoio, carinho e momentos de descontração.

Sou muito grato também aos meus cachorros, Tiffany e Faísca, os quais nunca falharam em realizar uma sessão de terapia canina para aliviar as preocupações e estresses do dia a dia.

À toda minha família pelos ensinamentos compartilhados e pelas experiências vividas. Faço aqui uma homenagem a meus avós Mario Lacroix e Ione Broock, os quais não estão mais entre nós para presenciar este momento, porém seu amor e carinho são parte de quem eu sou e foram essenciais nesta trajetória.

Aos meus amigos, os quais se fizeram sempre presentes, muitos mesmo à distância, e me motivaram a persistir nesta difícil jornada de graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Ao meu orientador, Rodrigo de Almeida Mohedano, o qual, por todo o auxílio prestado, possibilitou a realização deste trabalho. Agradeço também pela paciência, prestatividade e pelos conselhos ao longo deste último semestre de graduação.

Agradeço aos membros da banca, Patrícia Kazue e Nelson Libardi, por aceitarem o convite na avaliação deste trabalho e pelas considerações finais.

Por fim, agradeço ao Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental e à Universidade Federal de Santa Catarina, por proporcionar esta experiência única em minha vida.

“Se a deterioração da qualidade do ambiente começou quando o Homem fundou os primeiros agregados populacionais e decidiu alterar o meio que o rodeava para seu conforto, é apenas justo que se espere que esse mesmo Homem, agora possuidor de vastos conhecimentos e tecnologia, restaure a qualidade a esse ambiente que sempre o abrigou”

(CARAPETO, 1999).

RESUMO

A geração de energia hidrelétrica possui grande relevância nacional e internacional, uma vez que coloca o país na segunda posição dentre as nações com a maior capacidade instalada. Este tipo de empreendimento consiste na construção de reservatórios, os quais podem trazer benefícios sociais e econômicos por meio dos seus usos múltiplos, porém também são amplamente estudados os diversos impactos ambientais negativos observados durante as fases de instalação e operação, sendo a alteração da qualidade da água, um dos principais fatores adversos. Em rios que possuem reservatórios em cascata, a alteração da qualidade da água pode ainda sofrer efeitos cumulativos. Este estudo, objetivou avaliar os possíveis efeitos adversos sobre a qualidade da água em dois empreendimentos hidrelétricos em cascata e analisar a efetividade do uso de índices compostos (IQA, IET, IQAR) para o estudo ambiental dos reservatórios entre 2013 e 2020. Os dados foram analisados conforme limites presentes na Resolução CONAMA 357/2005, de acordo com o enquadramento do corpo d'água e quanto às classificações presentes nas metodologias utilizadas (IQA, IET, IQAR). Foram aplicados testes estatísticos que permitiram a verificação da existência de efeitos cumulativos e correlações entre os dados analisados, para posterior elaboração de hipóteses quanto ao comportamento dos parâmetros analisados neste estudo. Verificou-se de forma recorrente, o não atendimento às faixas de valores previstas para o enquadramento do corpo hídrico como Classe 2, principalmente para os parâmetros Fósforo Total (61,1% para o ponto P4-Fundo PCH II), Demanda Bioquímica de Oxigênio (41,7% para o ponto P4-Fundo PCH II) e Oxigênio Dissolvido (19,3% para o ponto P2-Fundo na PCH I). Devido aos altos valores citados, foi registrado em certos momentos baixa qualidade da água por meio dos índices ambientais, alcançando valores de qualidade d'água Ruim (IQA), estado de mesotrofia do corpo d'água (IET) e ambiente criticamente degradado (IQAR). A eficiência dos índices de qualidade ambiental apresentou variabilidade entre ambas as localidades, não havendo inicialmente uma correlação entre os resultados obtidos. Portanto, se faz imperativo o uso complementar de parâmetros referentes à qualidade da água e ao uso desejado para o corpo hídrico em estudo, uma vez que as metodologias existentes muitas vezes analisam de forma exageradamente simplificada estas informações. Por meio dos testes de T Pareado e Wilcoxon, não foram encontradas evidências que comprovem a existência de efeitos cumulativos na qualidade da água causada pelo layout em cascata.

Palavras-chave: Empreendimentos Hidrelétricos em cascata. Índices de Qualidade Ambiental. Qualidade da Água. Reservatório Artificial.

ABSTRACT

The generation of hydroelectric energy has great national and international relevance, as it places the country in the second position among the nations with the largest installed capacity. This type of project consists of the construction of reservoirs, which can bring social and economic benefits through their multiple uses, but the various negative environmental impacts observed during the installation and operation phases are also widely studied, with the change in the quality of the water, being one of the main adverse factors. In rivers that have cascading reservoirs, the change in water quality can still suffer cumulative effects. This study aimed to evaluate the possible adverse effects on water quality in two hydroelectric projects in cascade and analyze the effectiveness of the usage of composite indices (IQA, IET, IQAR) for the environmental study of reservoirs between 2013 and 2020. The data were analyzed according to the limits present in CONAMA Resolution 357/2005, according to the framework of the water body and regarding the classifications present in the methodologies used (IQA, IET, IQAR). Statistical tests were applied to verify the existence of cumulative effects and correlations between the data analyzed, for further elaboration of hypotheses regarding the behavior of the parameters analyzed in this study. It was verified recurrently, the non-compliance with the ranges of values foreseen for the classification of the water body as Class 2, mainly for the parameters Total Phosphorus (61.1% for the point P4-Fund SHP II), Biochemical Oxygen Demand (41.7% for P4-Bottom SHP II) and Dissolved Oxygen (19.3% for P2-Bottom of SHP I). Due to the high values mentioned, low water quality was recorded at certain times through environmental indices, reaching values of Poor water quality (IQA), mesotrophy status of the water body (IET) and critically degraded environment (IQAR). The efficiency of the environmental quality indices showed variability between both locations, initially not having a correlation between the results obtained. Therefore, the complementary use of parameters related to water quality and the desired use for the water body under study is imperative since the existing methodologies often analyze this information in an exaggeratedly simplified way. Through the Paired T and Wilcoxon tests, no evidence was found to prove the existence of cumulative effects on water quality caused by the cascade layout.

Keywords: Cascade Hydroelectric Developments. Environmental Quality Indicators. Water quality. Artificial Reservoir.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diversidade e abundância da ictiofauna de empreendimentos em cascata.	12
Figura 2 – Mapa de delimitação do PACUERA, PCH I	19
Figura 3 - Uso e Ocupação do Solo no Entorno do Reservatório Artificial, PCH I.....	20
Figura 4 - Uso e Ocupação do Solo no Entorno do Reservatório Artificial, PCH II....	22
Figura 5 - Mapa de localização dos municípios.....	24
Figura 6 - Localização Bacia Apuaê-Inhandava e empreendimentos estudados	28
Figura 7 – Curvas Médias de Variação de Qualidade das Águas.	31
Figura 8 - Fluxograma metodológico	41
Figura 9 - Localização dos pontos amostrais e barramento da PCH I	50
Figura 10 - Localização dos pontos amostrais e barramento da PCH II	52
Figura 11 - IQA Comparativo entre empreendimentos.....	108
Figura 12 - IET comparativo entre empreendimentos	110
Figura 13 - IQAR Comparativo entre empreendimentos	112

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Consumo de energia elétrica no mundo por região (TWh).....	4
Tabela 2 - Capacidade instalada de geração elétrica no Brasil (MW).....	5
Tabela 3 - Uso e Ocupação do Solo na área do PACUERA, PCH I.....	18
Tabela 4 - Uso e Ocupação do Solo na área do PACUERA, PCH II.....	21
Tabela 5 - População residente nos municípios de Barracão e Pinhal da Serra, RS	25
Tabela 6 - Parâmetros e pesos relativos do IQA NSF.....	32
Tabela 7 - Classificação de qualidade para o IQA NSF.....	32
Tabela 8 - Parâmetros e pesos relativos do IQA CETESB.....	33
Tabela 9 - Classificação de qualidade para o IQA CETESB.....	34
Tabela 10 - Parâmetros e pesos relativos do IQA COMITESINOS.....	35
Tabela 11 - Classificação de qualidade para o IQA COMITESINOS.....	35
Tabela 12 - Classificações para o Índice de Estado Trófico para reservatórios.....	36
Tabela 13 - Valores de classificação do IQAR.....	38
Tabela 14 - Parâmetros utilizados para o cálculo do IQAR.....	38
Tabela 15 - Parâmetros utilizados para os cálculos dos índices ambientais.....	42
Tabela 16 - Fórmulas para determinação do IQA. Fonte: TONIOLO, 2020.....	45
Tabela 17 - Pontos de Amostragem PCH I.....	49
Tabela 18 - Pontos de Amostragem PCH II.....	50
Tabela 19 - Clorofila-a, PCH I.....	56
Tabela 20 - Clorofila-a, PCH II.....	57
Tabela 21 - Coliformes Termotolerantes, PCH I.....	59
Tabela 22 - Coliformes Termotolerantes, PCH II.....	60
Tabela 23 - Demanda Bioquímica de Oxigênio, PCH I.....	62
Tabela 24 - Demanda Bioquímica de Oxigênio, PCH II.....	63
Tabela 25 - Fósforo Total, PCH I.....	65
Tabela 26 - Fósforo Total, PCH II.....	66
Tabela 27 - Nitrato, PCH I.....	68
Tabela 28 - Nitrato, PCH II.....	69
Tabela 29 - Oxigênio Dissolvido, PCH I.....	71
Tabela 30 - Oxigênio Dissolvido, PCH II.....	72

Tabela 31 - pH, PCH I.....	74
Tabela 32 - pH, PCH II.....	75
Tabela 33 - Sólidos Suspensos, PCH I.....	77
Tabela 34 - Sólidos Suspensos, PCH II.....	78
Tabela 35 - Temperatura da água, PCH I.....	81
Tabela 36 - Temperatura da água, PCH II.....	82
Tabela 37 - Turbidez, PCH I.....	84
Tabela 38 - Turbidez, PCH II.....	86
Tabela 39 - Índice de Qualidade de Água, PCH I.....	88
Tabela 40 - Índice de Qualidade da Água, PCH II.....	89
Tabela 41- Índice de Estado Trófico, PCH I.....	91
Tabela 42 - Índice de Estado Trófico, PCH II.....	92
Tabela 43 - Índice de Qualidade da Água de Reservatórios, PCH I.....	94
Tabela 44 - Índice de Qualidade da Água de Reservatórios, PCH II.....	96

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRAPCH - Associação Brasileira de Pequenas Centrais Hidrelétricas e Centrais Geradoras Hidrelétricas e toda a cadeia produtiva

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

APP – Área de Proteção Ambiental

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

COMITESINOS – Comitê de Gerenciamento da Bacia Hidrográfica do Rio dos Sinos

CGE – Central Geradora Hidrelétrica

DQO – Demanda Química de Oxigênio

DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio

EIA – Estudo de Impacto Ambiental

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

GW – Gigawatt

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IET – Índice de Estado Trófico

IQA – Índice de Qualidade da Água

IQAR – Índice de Qualidade da Água de Reservatório

KM² - Quilômetros quadrados

MMA – Ministério do Meio Ambiente

MW - Megawatt

NSF – National Sanitation Foundation

PACUERA – Plano Ambiental de Conservação e Uso do Reservatório Artificial

PCH – Pequena Central Hidrelétrica

PRNH – Política Nacional de Recursos Hídricos

SRNH – Sistema Nacional de Recursos Hídricos

TW - Terawatt

UHE – Usina Hidrelétrica

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	OBJETIVOS	3
2.1.	Objetivo Geral.....	3
2.2.	Objetivos Específicos	3
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1.	MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA E A HIDRELETRICIDADE	4
3.1.1.	Pequena Central Hidrelétrica (PCH).....	6
3.2.	RESERVATÓRIOS ARTIFICIAIS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA	7
3.2.1.	Impactos Ambientais decorrentes do represamento das águas	8
3.2.1.1.	Eutrofização.....	9
3.2.1.2.	Impactos sobre a ictiofauna local	11
3.3.	LEGISLAÇÃO REFERENTE À UTILIZAÇÃO DE RECURSOS HÍDRICOS PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA	13
3.3.1.	Licenciamento para geração de energia hidrelétrica	13
3.3.2.	Legislação local pertinente aos empreendimentos em estudo	15
3.4.	CARACTERIZAÇÃO DOS EMPREENDIMENTOS (PCHs) ESTUDADOS	17
3.4.1.	Pequena Central Hidrelétrica I.....	17
3.4.1.1.	Uso e Ocupação do Solo no entorno do Reservatório Artificial	17
3.4.2.	Pequena Central Hidrelétrica II.....	20
3.4.2.1.	Uso e Ocupação do Solo no entorno do Reservatório Artificial	21
3.4.3.	Características locais	22
3.4.3.1.	População.....	23
3.4.3.2.	Saneamento Básico	25
3.4.3.3.	Atividades Econômicas	26
3.4.3.4.	Bacia Hidrográfica	26

3.5.	PARÂMETROS PARA A DETERMINAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA..	28
3.5.1.	IQA	29
3.5.1.1.	IQA CETESB	33
3.5.1.2.	IQA COMITESINOS	34
3.5.2.	IET	36
3.5.3.	IQAR.....	37
3.6.	ESTADO DA ARTE NO USO DE ÍNDICES AMBIENTAIS	39
4.	METODOLOGIA.....	41
4.1.	FLUXOGRAMA METODOLÓGICO	41
4.2.	DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS ADOTADOS	42
4.3.	AVALIAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DA QUALIDADE DA ÁGUA.....	43
4.3.1.	Índices Ambientais	43
4.3.1.1.	Índice de qualidade da Água COMITESINOS (IQA).....	43
4.3.1.2.	Índice de Estado Trófico (IET).....	45
4.3.1.3.	Índice de Qualidade da Água de Reservatórios (IQAR)	47
4.4.	COLETA E ANÁLISE DE DADOS	47
4.4.1.	Pontos Amostrais	48
4.4.1.1.	Estações de amostragem no reservatório da PCH I.....	48
4.4.1.2.	Estações de amostragem no reservatório da PCH II.....	50
4.4.2.	Análise e processamento dos dados	52
4.4.2.1.	Análise de dados	53
4.4.2.2.	Elaboração de elementos gráficos	54
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
5.1.	AVALIAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DA QUALIDADE DA ÁGUA.....	55
5.1.1.	Variáveis Físicas, Químicas e Microbiológicas	55
5.1.1.1.	Clorofila-a	55

5.1.1.2.	Coliformes termotolerantes (NMP)	58
5.1.1.3.	DBO ₅	61
5.1.1.4.	Fósforo Total	64
5.1.1.5.	Nitrato	67
5.1.1.6.	Oxigênio Dissolvido	70
5.1.1.7.	pH	73
5.1.1.8.	Sólidos Suspensos	77
5.1.1.9.	Temperatura da Água	80
5.1.1.10.	Turbidez	84
5.1.2.	Índices ambientais	88
5.1.2.1.	IQA COMITESINOS	88
5.1.2.2.	IET	90
5.1.2.3.	IQAR	94
5.2.	APLICAÇÃO DOS ÍNDICES DE QUALIDADE AMBIENTAL	97
5.3.	AVALIAÇÃO DOS EFEITOS CUMULATIVOS	98
5.3.1.	Parâmetros para avaliação da qualidade da água	99
5.3.1.	IQA COMITESINOS	105
5.3.2.	IET	108
5.3.1.	IQAR	111
6.	CONCLUSÃO	112
7.	RECOMENDAÇÕES	114

1. INTRODUÇÃO

De acordo com a Agência Nacional das Águas (ANA, 2019), no Brasil a intermitência no abastecimento e mesmo a falta de água para distribuição é uma realidade de parte significativa dos municípios, principalmente na região nordeste do país, a qual possui um déficit hídrico natural, e nos grandes centros urbanos das regiões Sudeste e Centro-Oeste, os quais estão enfrentando desafios para abastecer este grande contingente populacional. A crise hídrica que ocorre em muitas regiões do planeta não é limitada somente a secas prolongadas, mas também a extremos hidrológicos, intensas precipitações que são igualmente danosas às propriedades, à saúde humana e ao funcionamento do ecossistema (Tundsi e Tundsi, 2012). Ainda segundo a ANA (2019), apenas 27% da população Brasileira vive em localidades com abastecimento considerado satisfatório e seguro ao longo do ano, assegurando que a água seja fornecida para todos, independentemente de condição social, econômica ou cultural, gênero ou etnia.

Tendo em mente a escassez de água, em quantidade e qualidade satisfatórias para grande parte da população a nível nacional e global, dentre os usos múltiplos elencados para os corpos hídricos encontra-se o ponto principal deste debate, a geração de energia por meio de empreendimentos hidrelétricos. Na América do Sul, praticamente todas as grandes bacias hidrográficas foram alteradas pela construção de barragens e grandes reservatórios (TUNDISI et al., 2005). Segundo o Banco de Informações de Geração Elétrica nacional, o Brasil possui um total 9.202 empreendimentos voltados para geração de energia elétrica, somando 176GW de potência instalada, sendo 83% (146GW) originária de fontes renováveis e 17% (30GW) de fontes não renováveis (ANEEL, 2020). Ainda, deste percentual para fontes renováveis, a matriz hídrica corresponde por cerca de 62,53% da capacidade de geração, portanto 109GW.

Independentemente do empreendimento, ao produzir energia, geram-se impactos ambientais dos mais variados níveis de degradação, e por isso é de suma importância que ao planejar a geração de energia elétrica, sejam levados em consideração não somente seus benefícios econômicos, mas também o que esta

geração trará de consequências para o meio ambiente. (SÁNCHEZ, 2013). Dentre os principais impactos ambientais negativos relacionados à implantação de empreendimentos hidrelétricos podemos citar a inundação de áreas extensas, interferência na migração e reprodução de peixes, reestruturação das comunidades aquáticas, alteração da dinâmica dos rios e mudança nas características físico-químicas da água. Todavia, é ainda uma forma de gerar energia elétrica mais barata do que outras plantas industriais, como a usina nuclear, e menos agressiva ambientalmente do que as usinas termoelétricas a petróleo ou carvão, sendo considerada uma fonte renovável e limpa (ANDRADE, 2010).

Empreendimentos hidrelétricos em operação no Brasil, como forma de cumprimento das condicionantes presentes em suas licenças ambientais, emitem periodicamente relatórios acerca da qualidade da água, pode-se dizer confortavelmente que são gerados dados brutos em abundância. Os parâmetros que influenciam a qualidade das águas são numerosos e com particularidades e interações complexas que demandam atenção e meticulosidade nas suas análises. Porém atualmente são utilizados diversos índices de qualidade ambiental, os quais determinam faixas de valores onde certas características são comuns para os ambientes em estudo. Estes índices facilitam a compreensão, replicação e comparação dos resultados obtidos, pela padronização da sua metodologia de cálculo, além de conseguirem resumir um grande volume de informações em uma única informação. Porém, conforme destaca Espejo et al., (2012), algumas características importantes podem ser perdidas durante o processo de cálculo, visto que estes índices assumem diversos parâmetros para sua determinação, ignorando por vezes particularidades importantes das substâncias envolvidas.

Portanto, a partir destes dados de monitoramentos compulsórios, após devido processo de interpretação, podemos gerar informações com alto grau de confiabilidade, gerando assim um importante subsídio para gestão ambiental nos âmbitos do poder público municipal, estadual e federal. Diante do exposto, o presente estudo objetivou a avaliação da existência de efeitos cumulativos no respectivo corpo hídrico e a verificação da eficácia de índices ambientais na aferição da qualidade da água, por meio da avaliação das condições de preservação dos corpos hídricos e análises estatísticas dos dados coletados.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Estudar a evolução da qualidade da água entre dois empreendimentos de geração de energia hidrelétrica para verificação da existência de possíveis efeitos cumulativos causados pelos barramentos em cascata.

2.2. Objetivos Específicos

- Avaliar a evolução nas condições de preservação dos corpos hídricos por meio da análise de parâmetros e índices de qualidade da água;
- Avaliar a existência de efeitos cumulativos nos parâmetros de qualidade analisados, causados pela operação dos empreendimentos em cascata;
- Verificar a eficácia dos índices de qualidade da água estudados e propor alternativas para mitigação de inconsistências.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA E A HIDRELETRICIDADE

O aumento exponencial do crescimento demográfico, concomitantemente com os processos intensificados de industrialização e a grande disseminação do comportamento consumista e imediatista, resultaram conseqüentemente em um aumento pela demanda de energia elétrica mundial. Esta grande demanda por energia elétrica provoca uma corrida para o desenvolvimento de novos empreendimentos para sua geração, seja de fontes renováveis ou de fontes provenientes de combustíveis fósseis. Conforme demonstrado na Tabela 1, entre os anos de 2017 e 2018, houve um crescimento de 4% no consumo total de energia elétrica no mundo, correspondendo a aproximadamente 1,5TWh.

Tabela 1 - Consumo de energia elétrica no mundo por região (TWh).

	2017	2018	Δ% (2018/2017)	Part. % (2018)
Mundo	22.471	23.381	4,0	100,0
América do Sul e Central	1.082	1.099	1,6	4,7
África	657	669	1,9	2,9
América do Norte	4.704	4.863	3,4	20,8
Ásia & Oceania	10.301	10.977	6,6	46,9
Eurásia	1.290	1.314	1,8	5,6
Europa	3.434	3.442	0,2	14,7
Oriente Médio	1.004	1.016	1,2	4,3

Fonte: EPE (2020).

O cenário do consumo de energia elétrica nacional segue a mesma tendência apresentada pelos demais países do globo, de acordo com dados da Empresa de Pesquisa Energética, quando analisado o número absoluto de consumidores de energia elétrica no Brasil observamos um crescimento de 1,7% entre 2018 e 2019, totalizando 85.071 consumidores neste ano.

Historicamente, o Brasil se destaca por ser um país com um alto percentual de fontes renováveis de energia em sua oferta interna quando comparado ao resto do mundo. A geração de hidreletricidade é considerada de grande relevância no Brasil, em virtude de ser, em termos gerais, mais barata do que as demais modalidades de geração. Outro ponto positivo é fato de ser uma forma energia renovável, pelos efeitos da energia solar e da força da gravidade, o líquido transforma-se em vapor que se condensa em nuvens, que retornam à superfície terrestre sob a forma de chuva (ANEEL, 2008). Os registros de geração hidrelétrica para os anos de 2017-2018 colocam o Brasil na segunda posição, estando atrás apenas da China, dentre as nações com a maior capacidade instalada de geração hidrelétrica, sendo responsável por 8,1% da capacidade global e com um crescimento absoluto de 3,8%, o maior dentre os 10 países com maior capacidade instalada.

A participação de empreendimentos hidrelétricos, quando analisada a matriz energética nacional, se torna ainda mais expressiva, correspondendo por aproximadamente 62,5% dos 174,7GW instalados no Brasil em 2021, segundo o Anuário Estatístico de Energia Elétrica da EPE e explicitado na Tabela 2.

Tabela 2 - Capacidade instalada de geração elétrica no Brasil (MW).

	2019	2020	Δ% (2020/2019)	Part. % (2020)
Total	170.118	174.737	2,7	100,0
Usinas Hidrelétricas	102.999	103.027	0,0	59,0
PCH	5.291	5.429	2,6	3,1
CGH	768	816	6,2	0,5
Gás Natural	13.385	14.927	11,5	8,5
Derivados de Petróleo	7.670	7.696	0,3	4,4

Carvão	3.228	3.203	-0,8	1,8
Usinas Nucleares	1.990	1.990	0,0	1,1
Biomassa	14.703	15.011	2,1	8,6
Usinas Eólicas	15.378	17.131	11,4	9,8
Solar	2.473	3.287	32,9	1,9
Outras	2.234	2.221	-0,6	1,3

Fonte: EPE (2020)

Em 2020, de acordo com informações da ANEEL, estiveram em operação 1.382 empreendimentos de geração de energia hídrica. Fato mais impressionante é que apenas cerca de 30% do potencial hidrelétrico nacional foi explorado, baixo percentual quando comparado com países desenvolvidos. (EPE, 2011).

3.1.1. Pequena Central Hidrelétrica (PCH)

A definição de Pequena Central Hidrelétrica apresenta conceitos diferentes nos países do mundo, não existindo atualmente uma determinação internacional neste quesito. Segundo ELETROBRÁS (1999), as Pequenas Centrais Hidrelétricas são projetos de baixo impacto ambiental com menor volume de investimentos e potência limitada.

No Brasil, o enquadramento dos empreendimentos hidrelétricos é de responsabilidade da Agência Nacional de Energia Elétrica, a qual age por meio de suas resoluções normativas. Por meio da Resolução Normativa ANEEL nº 673, de 4 de agosto de 2015, foram definidas Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs) como sendo empreendimentos:

- Destinados a autoprodução ou produção independente de energia elétrica, com potência superior a 3.000kW e igual ou inferior a 30.000kW;
- Possuam reservatório inferior a 13km², excluindo a calha do leito regular do rio ou superior desde que o reservatório seja de regularização semanal ou inferior.

- Reservatórios que apresentem outras finalidades que não a geração de energia;

Segundo Castro et al. (2009) a utilização de PCHs possibilita a geração de energia limpa a preços competitivos, com a construção deste tipo de empreendimento requerendo menos tempo necessário para sua finalização em comparação com projetos hídricos de grande porte, permitindo assim rápida expansão da capacidade de geração nacional. As PCHs, em comparação com as UHEs, apresentam vantagens como menor impacto ambiental, menor tempo de implantação, e projetos mais simples e adaptáveis à cursos d'água menores (ALBARELLO, 2014).

Segundo Dias (2014) Uma das vantagens de uma PCH é o fato de este tipo de empreendimento resultar em maiores impactos ambientais positivos e o benefício à geração descentralizada. A PCH é uma alternativa que viabiliza o aproveitamento do potencial de rios próximos às regiões consumidoras de pequeno porte, aproveitando a força da água para gerar energia, sem causar mudanças físicas no curso do rio (PORTAL PCH, 2010).

3.2. RESERVATÓRIOS ARTIFICIAIS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA

A construção de represas é uma das mais antigas e importantes intervenções humanas nos ecossistemas naturais. Barragem é o elemento estrutural artificial construído transversalmente à direção do escoamento de um curso d'água, formando um reservatório artificial, com a finalidade de acumular água ou elevar seu nível (CARVALHO, 2006). Represas artificiais são sistemas dinâmicos e complexos e a compreensão científica dos padrões de funcionamento desses ecossistemas, individualmente ou em cascata, é uma tarefa interdisciplinar que integra estudos básicos de Biologia, Química, Geologia, Física e Engenharia. (TUNDSI, 2005). Ao longo do último meio século, muitos reservatórios em cascata foram construídos em grandes rios para diversos fins, incluindo controle de enchentes, geração de energia, navegação, água potável e irrigação (Winemiller et al., 2016).

De acordo com Tundsi e Tundsi (2008), todos os continentes contam com represas construídas em seus principais cursos d'água, ocasionando como

consequência da sua implantação e operação, uma série de impactos, negativos e positivos, sobre os meios físico, biótico e socioeconômico da região de entorno. De acordo com a Agência Nacional das Águas (2005), um dos principais problemas causados pela implantação de usinas hidrelétricas é a área inundada para a formação do reservatório e seus impactos na área diretamente afetada. Porém, os impactos diferem entre reservatórios implantados isoladamente e empreendimentos em cascata, os quais estão ficando mais comuns na realidade atual, onde grande parte dos fluxos d'água já possuem barramentos para o seu aproveitamento nos mais diversos usos. Yuan et al. (2021), em seu estudo sobre os impactos dos reservatórios em cascata no Rio Jinsha (China), afirma que os efeitos repetitivos e cumulativos dos reservatórios em cascata podem alterar significativamente a hidrogeoquímica do rio, diferindo dos impactos estudados em reservatórios individuais. Reservatórios em cascata transformaram simultaneamente os sistemas fluviais lóticos em sistemas de reservatórios em série, descontínuos e de fluxo lento (Shi et al., 2017).

3.2.1. Impactos Ambientais decorrentes do represamento das águas

A qualidade da água pode ser influenciada naturalmente, por meio da geologia, clima, vegetação, solo da bacia hidrográfica em que o corpo hídrico está inserido, ou pela influência antrópica, através de atividades relacionadas ao crescimento populacional e industrial, nas margens de rios e tributários, que promovem modificações das condições naturais da água (TUNDISI; TUNDISI, 2008). Somado a este fato, temos ainda consequências da alteração climática que vem ocorrendo nas últimas décadas, como variação na temperatura e nos padrões de chuva, podem impactar severamente o regime hidrológico das bacias e, conseqüentemente, dos reservatórios nela inseridos, afetando assim tanto a periodicidade quanto a magnitude do aporte natural de nutrientes para o corpo d'água.

Os empreendimentos hidrelétricos apresentam a ideia de geração de energia de forma renovável e limpa, sendo uma vantagem sobre outras formas de obtenção de energia. Porém, inúmeros exemplos vem mostrando o contrário, apresentando assim a necessidade de uma análise adequada sobre os impactos socioambientais

gerados (BERMANN,2007). O barramento d'água, impõe profundas mudanças na escala temporal espacial dos fenômenos que ocorrem na água, conseqüentemente isto altera sensivelmente os processos físicos, químicos e biológicos do sistema (CRUZ; FABRIZY, 1995). De forma complementar, Henry (1999) diz que represas artificiais representam uma inserção nova do ponto de vista de ecossistema aquático, promovendo consideráveis alterações no regime hidrológico e na dinâmica ecológica de rios e bacias hidrográficas. Ao se interceptar o fluxo d'água de um rio, além de causar inúmeras modificações num amplo espectro de atividades e processos ao longo da bacia, as represas interferem nos processos de evolução nas comunidades de organismos aquáticos, peixes, plânctons e qualidade de água. Neste contexto, deve-se considerar a fertilização crescente do reservatório, com o aumento da produção de nutrientes e de matéria orgânica e a perda de qualidade da água, fenômeno conhecido por eutrofização. (GUIMARÃES JR. Et al., 1998).

A construção de empreendimentos hidráulicos, nos ambientes lóticos, tem proporcionado diferentes tipos de impactos no sistema aquático. Um dos mais importantes impactos quali-quantitativos em rios, lagos e represas é o da eutrofização, que afeta, com maior ou menor intensidade, praticamente todos os ecossistemas aquáticos continentais (TUNDISI E MATSUMURA-TUNDISI, 2008). Ainda, Esteves (1998) afirma que a transformação do ambiente lótico em lêntico promove uma série de alterações espaço-temporal no rio, tais como o aumento da taxa de sedimentação, a inundação de áreas, alterações físicas e químicas no meio aquático e modificações na fauna e flora silvestres. Portanto, as mudanças decorrentes do represamento de rios fazem com que o monitoramento dos padrões de qualidade destes "novos" ecossistemas aquáticos sejam de grande importância para a preservação e manutenção do equilíbrio da qualidade da água com a atividade de geração de energia elétrica.

3.2.1.1. Eutrofização

A eutrofização é o aumento da concentração de nutrientes, especialmente fósforo e nitrogênio, nos ecossistemas aquáticos, que tem como conseqüência o

aumento de suas produtividades (ESTEVEES, 1988). De acordo com Battarbee e Bennion (2010) e Esteves (1998) é possível afirmar que a eutrofização dos ecossistemas pode ser causada por processos naturais ou induzida pela atividade humana, sendo este último caso oriunda principalmente pelo aporte excessivo de nutrientes como nitrogênio e fósforo, e relacionada com o aumento da população, da industrialização, do uso de fertilizantes químicos na agricultura e com a produção e uso de produtos de limpeza contendo compostos polifosfatados.

Quanto aos efeitos causados pela eutrofização das águas, Von Sperling (2005) afirma que temos como principais efeitos: anaerobiose no corpo d'água, mortalidade da fauna, toxicidade de algas, dificuldade e altos custos para o tratamento da água e redução da navegação e da capacidade de transporte. Entre os principais impactos causados pela eutrofização estão o aumento da contaminação dos corpos hídricos por metais e substâncias tóxicas (liberadas por algas), a depleção do oxigênio dissolvido, a redução do espelho d'água, a morte de plantas e animais aquáticos (MORAES, 2009). O processo de eutrofização artificial no seu estágio inicial favorece o crescimento de diferentes grupos ecológicos de macrófitas aquáticas (ESTEVEES, 1998).

No Brasil, diversos corpos d'água apresentam-se com médio ou elevado grau de trofia, principalmente aqueles próximos às áreas urbanas intensamente povoadas, ou em bacias hidrográficas com uso e ocupação desordenados, comprometendo a qualidade de água para diversos usos, inclusive o da geração de energia elétrica (TUNDISI, 2001). Nos rios, ambientes lóticos, as condições ambientais como turbidez e velocidades elevadas resultam em menor ocorrência de eutrofização (PORTO, 1991). O processo de eutrofização nas águas interiores ocorre principalmente em lagos e reservatórios, que são ambientes lênticos.

Segundo Maavara (2015) reservatórios hidrelétricos são excepcionalmente suscetíveis a apresentar problemas de eutrofização, devido ao acúmulo excessivo de nutrientes no ambiente aquático, gerando desequilíbrio no ecossistema local. As condições de eutrofização diferem de acordo com a fase de operação dos empreendimentos e com cada zona limnológica, sendo a fase enchimento operacional e a zona de transição as mais suscetíveis a este problema (OLIVEIRA et al., 2020).

Existem diferentes metodologias para a determinação do grau de trofia em reservatórios, baseando-se principalmente nas concentrações de nitrogênio, fósforo e clorofila-a e na transparência da coluna d'água. O Índice do Estado Trófico (IET) tem por objetivo classificar corpos hídricos em diferentes graus de trofia, avaliando a qualidade da água quanto ao enriquecimento por nutrientes. Dessa forma, pode fornecer subsídios para a formulação de planos de manejo e gestão de ecossistemas aquáticos, por meio de estratégias que visem à sustentabilidade dos recursos hídricos (LAMPARELLI, 2004). Soares (2008) afirma que apesar dos importantes avanços na área da limnologia nas últimas décadas, a eutrofização continua sendo um dos mais importantes problemas a serem trabalhados no sentido da proteção dos ecossistemas aquáticos.

3.2.1.2. *Impactos sobre a ictiofauna local*

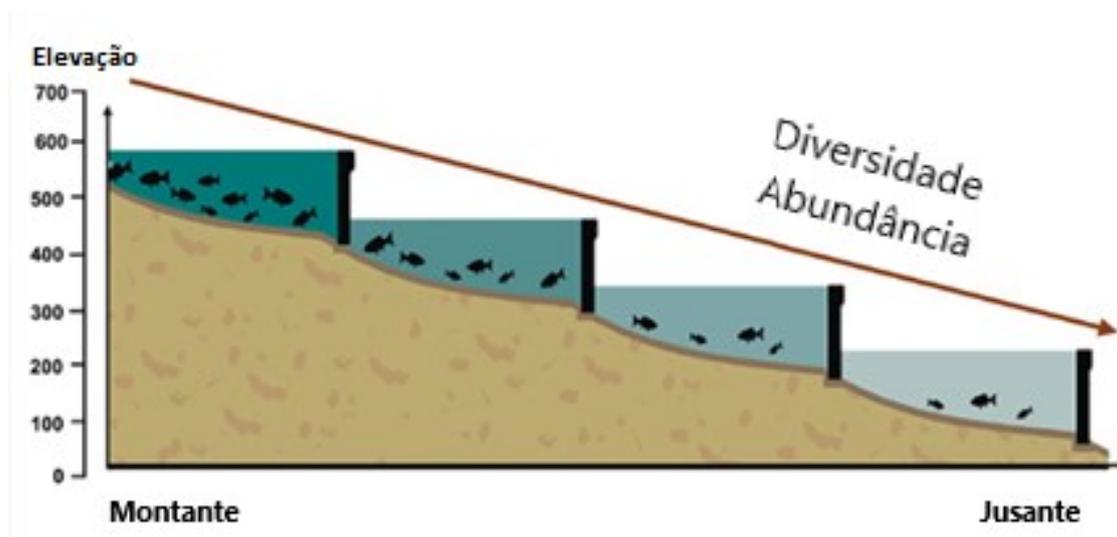
A ictiofauna é estritamente dependente das características de seu habitat para a manutenção de suas funções biológicas como nutrição, locomoção, reprodução. Peixes com características migratórias são ainda mais dependentes dessas características por necessitarem de diferentes habitats para as mais importantes fases do seu ciclo reprodutivo como desova, desenvolvimento de alevinos e maturação sexual (GODOY, 1995). Os regimes hidrológicos naturais refletem padrões históricos de longo prazo de variabilidade de fluxo que moldaram as adaptações em espécies ribeirinhas e continuam a moldar a comunidade e a estrutura e função do ecossistema, estruturando o modelo físico do habitat, fornecendo conectividade e enquadrando as interações bióticas (MIMS e OLDEN, 2012; POFF, 2017).

A construção de barramentos ocasiona a interrupção do regime de fluxo natural, conseqüentemente criando um ambiente lântico e aprisionando sedimentos e nutrientes no reservatório, reduzindo então a turbidez e a carga de nutrientes enviada a jusante (BAXTER, 1977; ROBERTO et al. 2009; AGOSTINHO et. al, 2008). De forma similar, Poff (2017) afirma que grandes barragens alteram os fluxos naturais do ecossistema, favorecendo mudanças dramáticas nos antigos habitats, normalmente

pelo esgotamento dos segmentos a jusante e transformando os segmentos a montante em habitats lânticos, homogêneos e ininterruptos.

Yang et al. (2020) demonstrou que diversas espécies endêmicas de peixes são facilmente afetadas pelas cascatas dos reservatórios, sendo fatores de influência para a quantificação deste impacto a posição longitudinal dos reservatórios e a proximidade entre os empreendimentos. De acordo com Agostinho et al., (2004) o bloqueio das rotas de migração pode acarretar o acúmulo de peixes a jusante das represas, afetando os aspectos reprodutivo de diversas espécies de peixes migratórios, podendo ser um dos fatores responsáveis pelo decréscimo nos números populacionais destas localidades. Ganassin et al. (2021), observou uma relação negativa entre riqueza de espécies, diversidade e a posição na cascata dos empreendimentos, indicando que a diversidade decresce a jusante na cascata. Fráguas et al., (2021) afirma ainda que os barramentos alteram a composição de espécies e biomassa local a jusante e montante, impactando na estrutura trófica não apenas no reservatório em questão, mas também nos ambientes lóticos adjacentes que não foram diretamente afetados pelo represamento das águas.

Figura 1 - Diversidade e abundância da ictiofauna de empreendimentos em cascata.



Fonte: Adaptado de Ganassin et al. (2021).

3.3. LEGISLAÇÃO REFERENTE À UTILIZAÇÃO DE RECURSOS HÍDRICOS PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA

A Constituição da República Federativa do Brasil, de 1988, determina no Artigo 20 que todas as águas brasileiras são bens públicos de domínio dos Estados ou da União, enquanto os rios transfronteiriços pertencem à União, e os demais são águas estaduais. A Lei 9.433, de 08 de janeiro de 1997 estabeleceu os instrumentos da Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e ainda proporcionou diretrizes para o enquadramento de corpos d'água segundo seus usos, a cobrança pelo uso da água, a outorga de direitos de uso dos recursos hídricos e para o Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos.

3.3.1. Licenciamento para geração de energia hidrelétrica

O licenciamento ambiental é um procedimento administrativo no qual o Poder Público, por meio do órgão ambiental competente, licencia a localização, a instalação, a ampliação e a operação de empreendimentos e atividades utilizadoras de recursos ambientais, consideradas efetiva ou potencialmente poluidoras, ou que possam causar degradação ambiental considerando as disposições legais e regulamentares e as normas técnicas aplicáveis a cada caso (BRASIL, 1997).

De maneira geral, o licenciamento ambiental brasileiro se distingue do procedimento adotado em grande parte dos países ao redor do globo, caracterizando-se basicamente pela existência de três fases distintas e interdependentes: Licença Prévia, Licença de Instalação e Licença de Operação.

1. Licença Prévia (LP) - concedida na fase preliminar do planejamento do empreendimento ou atividade aprovando sua localização e concepção, atestando a viabilidade ambiental e estabelecendo os requisitos básicos e

condicionantes a serem atendidos nas próximas fases de sua implementação;

2. Licença de Instalação (LI) - autoriza a instalação do empreendimento ou atividade de acordo com as especificações constantes dos planos, programas e projetos aprovados, incluindo as medidas de controle ambiental e demais condicionantes, da qual constituem motivo determinante;
3. Licença de Operação (LO) - autoriza a operação da atividade ou empreendimento, após a verificação do efetivo cumprimento do que consta das licenças anteriores, com as medidas de controle ambiental e condicionantes determinados para a operação.

As licenças ambientais poderão ser expedidas isolada ou sucessivamente, de acordo com a natureza, características e fase do empreendimento ou atividade (BRASIL, 1997).

Segundo o Ministério do Meio Ambiente (2018), no estado do Rio Grande do Sul, as seguintes competências principais sobre licenciamento ambiental são atribuídas:

Ainda, em cada uma destas etapas, de acordo com a análise do órgão ambiental responsável pelo licenciamento do empreendimento, poderão ser emitidas condicionantes socioambientais, as quais devem ser cumpridas pelo empreendedor sob pena de autuações e conseqüentes penalidades (multas ou mesmo a revogação do licenciamento vigente). As condicionantes do licenciamento ambiental brasileiro são cláusulas que estabelecem as condições, restrições, medidas administrativas e ambientais que deverão ser observadas pelo empreendedor para o gerenciamento dos impactos ambientais decorrentes da instalação e operação de empreendimentos e atividades objeto do licenciamento. Dentre as condicionantes ambientais aplicadas no licenciamento para empreendimentos de geração hidrelétrica de energia, podemos citar o monitoramento da qualidade das águas. Por meio da análise de diversos parâmetros físico-químicos, deve-se garantir o monitoramento das alterações nas características físicas, químicas e biológicas da água, decorrentes da implementação e operação dos empreendimentos em questão. As práticas relacionadas ao

monitoramento de qualidade de água incluem a coleta de dados e de amostras de água em locais pré-definidos, feita em intervalos regulares de tempo, de modo a gerar informações que possam ser utilizadas para a definição das condições presentes de qualidade da água.

Por fim, deve ser citada também a Lei nº 9433, de 8 de janeiro de 1997, a qual institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos e dá diretrizes quanto à necessidade de outorga de direitos de recursos hídricos pelo Poder Público, para o aproveitamento dos potenciais hidrelétricos, dentre outros usos. O regime de outorga de direitos de uso de recursos hídricos tem como objetivos assegurar o controle quantitativo e qualitativo dos usos da água e o efetivo exercício dos direitos de acesso à água (BRASIL, 1997). No artigo 13 desta mesma lei, está descrito que toda outorga estará condicionada às prioridades de uso estabelecidas nos Planos de Recursos Hídricos e deverá respeitar a classe em que o corpo de água estiver enquadrado e a manutenção de condições adequadas ao transporte aquaviário, quando for o caso. Desta forma, a outorga de uso dos recursos hídricos deverá preservar o uso múltiplo destes.

Devemos dar espaço também à algumas publicações realizadas pelo Conselho Nacional de Meio Ambiente: primeiramente temos a Resolução CNRH nº 37, de 26 de março de 2004, a qual estabelece diretrizes para a outorga de recursos hídricos na implementação de barragens em corpos d'água de domínio dos Estados, definindo regras de operação considerando os usos múltiplos locais e firma ainda que o usuário tem o dever que realizar monitoramento de pontos em montante, reservatório e jusante, encaminhando posteriormente o documento elaborado à análise de autoridade outorgante; Quanto ao atendimento aos usos múltiplos da água, o Conselho Nacional de Recursos Hídricos publicou a Resolução CONAMA nº 357, a qual sujeita os reservatórios e rios relacionados à empreendimentos hidrelétricos à diretrizes de qualidade de água por classe de enquadramento.

3.3.2. Legislação local pertinente aos empreendimentos em estudo

Levando em consideração as diretrizes em âmbito estadual, regional e municipal, as seguintes legislações também devem ser levadas em consideração: A Constituição do Estado do Rio Grande do Sul, de 1989; A “Lei das Águas Gaúcha” – Lei nº 10.350, de 30 de dezembro de 1994; A Resolução CRH/RS nº 342 de 11 de setembro de 2016.

A Constituição Estadual do Rio Grande do Sul, além de estabelecer normas gerais para o correto funcionamento da entidade federativa, também fornece diretrizes quanto aos assuntos tratados neste estudo, sendo eles: No Art. 7º determina que os rios com nascente e foz no território do estado e as águas superficiais ou subterrâneas, fluentes, emergentes e em depósito, ressalvadas aquelas decorrentes de obras da União, situadas em terrenos de seu domínio são bens do estado; No Art. 171 institui o Sistema Estadual de Recursos Hídricos e adota as bacias hidrográficas como unidades básicas de planejamento e gestão.

De modo complementar à Constituição do Estado, a “Lei das Águas Gaúcha” regulamenta o Artigo 171 da Constituição anteriormente citada e institui o Sistema Estadual de Recursos Hídricos, realizando a integração dele ao Sistema Nacional de Recursos Hídricos (SNRH). Delibera ainda, que a aprovação dos usos de recursos hídricos fica a critério do Estado, por meio do Artigo 3º, *“Todas as utilizações dos recursos hídricos que afetam sua disponibilidade qualitativa ou quantitativa, ressalvadas aquelas de caráter individual, para satisfação de necessidades básicas da vida, ficam sujeitas à prévia aprovação pelo Estado”*. Ainda, o Artigo 5º determina a descentralização da ação do estado por meio da participação comunitária através da criação de Comitês de Gerenciamento de Bacia Hidrográficas.

De forma regional, o Comitê de Gerenciamento da Bacia Hidrográfica dos Rios Apuaê–Inhandava, em conjunto com Conselho de Recursos Hídricos do Rio Grande do Sul elaborou a Resolução CRH/RS Nº 342, de 11 de setembro de 2019, a qual aprova o enquadramento das águas superficiais da Bacia Hidrográfica dos Rios Apuaê-Inhandava. Por meio desta resolução, podem ser analisadas as diretrizes para o Rio Bernardo José (onde os empreendimentos objetos deste estudo estão localizados), neste documento é determinado que o corpo d’água citado deve ser enquadrado como Classe 2. De acordo com o Artigo 2º, foram considerados para o

enquadramento os seguintes parâmetros: Demanda Bioquímica de Oxigênio, Oxigênio Dissolvido, Fósforo Total, Sólidos Dissolvidos Totais, Nitrogênio Amoniacal e Coliformes Termotolerantes. Por fim, o documento menciona que o enquadramento citado servirá de referência para as ações de gestão dos órgãos de recursos hídricos e de meio ambiente, visando o atendimento aos limites de lançamento para cada caso.

3.4. CARACTERIZAÇÃO DOS EMPREENDIMENTOS (PCHs) ESTUDADOS

3.4.1. Pequena Central Hidrelétrica I

A primeira barragem em cascata será denominada como PCH I, situada ao longo do rio Bernardo José (nas coordenadas 465722.63m E, 6926106.49m S) entre os municípios de Barracão e Pinhal da Serra, na região nordeste do estado do Rio Grande do Sul. Este empreendimento conta com área de reservatório de 25ha, totalizando um volume Máximo Normal de 0,6928hm³, barragem do tipo CCR (Concreto Compactado a Rolo) constituída por vertedouro tipo soleira livre e tomada d'água. O ativo está em operação há mais de dez anos e conta com duas unidades geradoras, totalizando uma potência instalada de 22,2MW.

Por razões de privacidade corporativa foi ocultado o verdadeiro nome da empresa mantenedora e dos empreendimentos analisados neste estudo.

3.4.1.1. *Uso e Ocupação do Solo no entorno do Reservatório Artificial*

O quadro de áreas de uso e ocupação do solo na área do entorno do reservatório artificial da PCH I foi elaborado pela consultoria ABG Engenharia e Meio Ambiente, a partir de interpretação de imagens do software Google Earth. A vegetação florestal é atualmente o principal uso do solo, somando 57,5%, seguido do campo com 29,2%, áreas de lavoura, somando 8,8% e outras ocupações de solo (1,1%) que não possuem significativa relevância para este estudo.

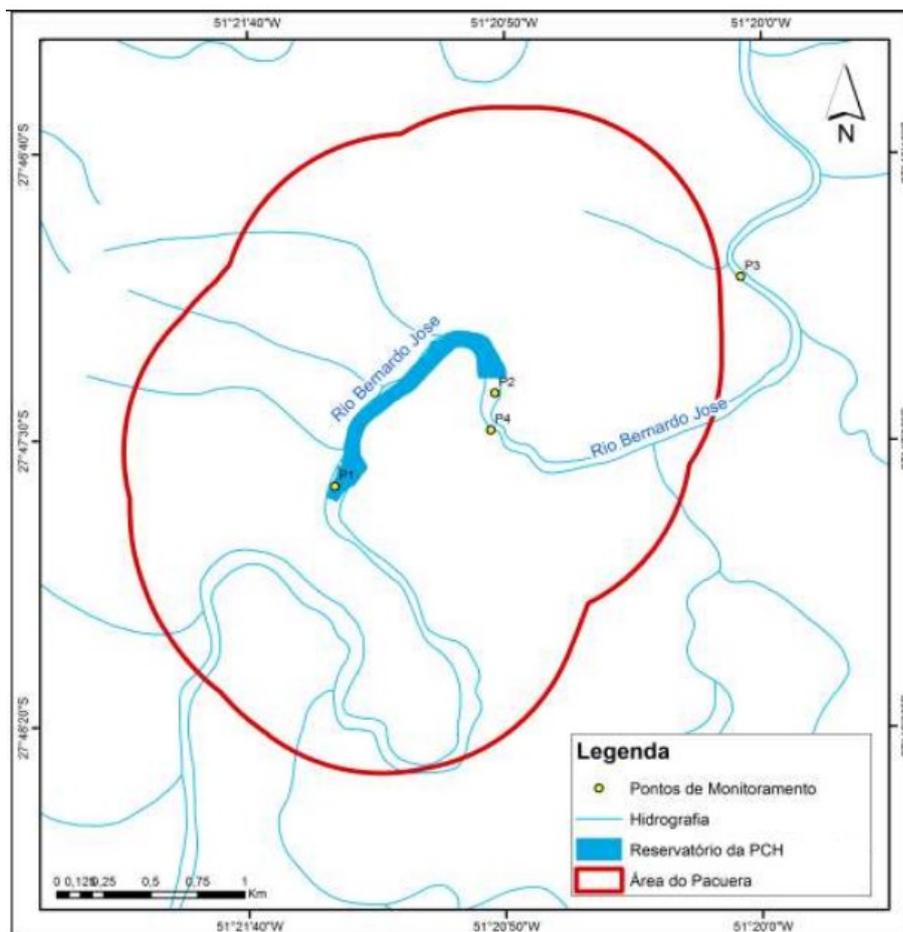
Tabela 3 - Uso e Ocupação do Solo na área do PACUERA, PCH I

Classes	Área (ha)	Porcentagem
Vegetação Florestal	477,00	57,5%
Campo	240,70	29,0%
Lavoura	73,20	8,8%
Curso d'água	30,50	3,6%
Outros	8,00	1,1%

Fonte: Estudo de Impacto Ambiental – PCH I

Na Figura 2 está ilustrada a área de influência direta do reservatório da PCH I, a qual corresponde a uma faixa de 1.000m do mesmo, onde estão delimitados os principais usos do solo para que sejam mantidas as condições para conservação da qualidade da água, do visual paisagístico, da ocupação ordenada e da estabilidade geológica das encostas.

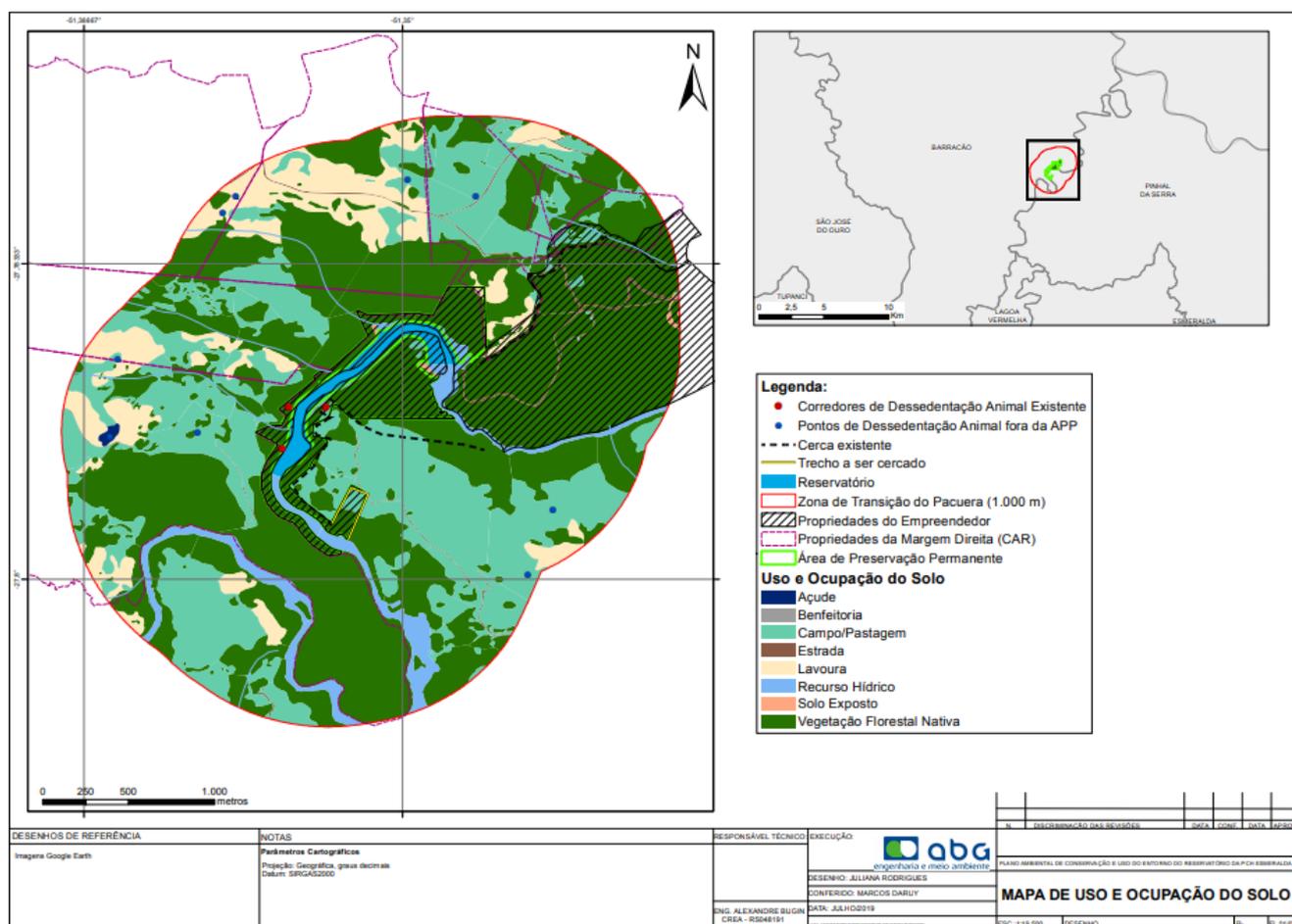
Figura 2 – Mapa de delimitação do PACUERA, PCH I



Fonte: Plano Ambiental de Conservação e Uso do Entorno do Reservatório – PCH I

A consolidação do Plano Ambiental de Conservação e Uso do Entorno do Reservatório Artificial da PCH I deve ocorrer em parceria com as Prefeituras Municipais e as mais diversas entidades localizadas dentro da área de influência. Na Figura 3 está ilustrado o mapa de uso e ocupação do solo.

Figura 3 - Uso e Ocupação do Solo no Entorno do Reservatório Artificial, PCH I



Fonte: Plano Ambiental de Conservação e Uso do Entorno do Reservatório – PCH I

3.4.2. Pequena Central Hidrelétrica II

A segunda barragem da cascata é a PCH II, situada ao longo do rio Bernardo José (nas coordenadas 467121.50 m E, 6927967.48 m S) bacia hidrográfica Apuauê-Inhandava, entre os municípios de Barracão e Pinhal da Serra, na região nordeste do estado do Rio Grande do Sul.

Este empreendimento conta com um reservatório de 11,7ha, totalizando um volume máximo de 2,74hm³ e barragem constituída por vertedouro tipo soleira livre e

tomada d'água. O ativo está em operação há mais de dez anos e conta com duas unidades geradoras, totalizando uma potência instalada de 13,7MW.

Por razões de privacidade corporativa foi ocultado o verdadeiro nome da empresa mantenedora e dos empreendimentos analisados neste estudo.

3.4.2.1. Uso e Ocupação do Solo no entorno do Reservatório Artificial

A PCH II não conta com PACUERA (Plano Ambiental de Conservação e Uso do Entorno e das Águas do Reservatório Artificial) elaborado, portanto, para este item foram utilizados dados contidos no Estudo de Impacto Ambiental (EIA) da mesma. O quadro de uso e ocupação do solo na área de influência foi elaborado pela consultora Ecosistêmica Engenharia e Meio Ambiente, a partir de interpretação de imagens do software Google Earth. A vegetação arbórea (campo) é o principal uso do solo, somando 57,6%, seguido das áreas de lavoura com 38,4%, cursos d'água somando 2,5%, vegetação florestal com 1,3% e outras ocupações do solo (0,2%) que não possuem significativa relevância para este estudo.

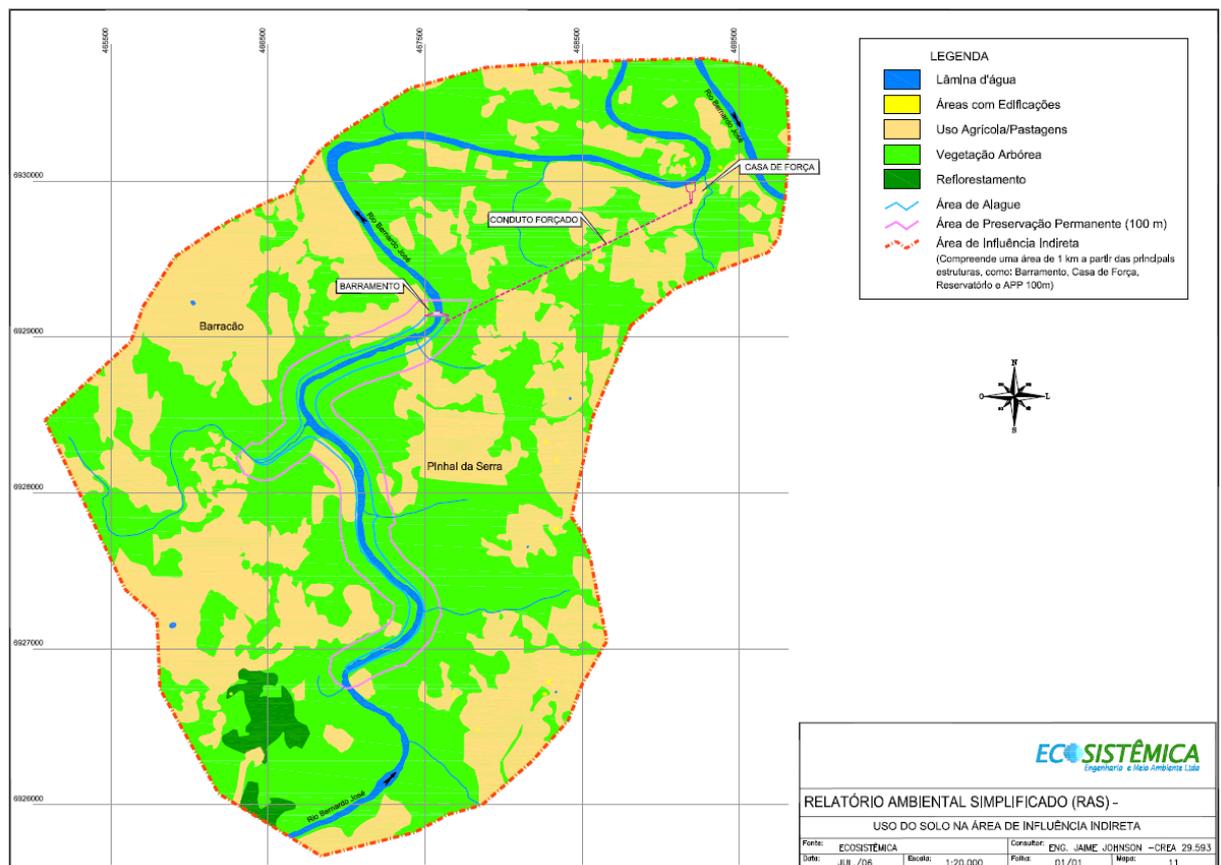
Tabela 4 - Uso e Ocupação do Solo na área do PACUERA, PCH II

Classes	Área (ha)	Porcentagem
Campo	825,40	57,6%
Lavoura	549,90	38,4%
Curso d'água	36,70	2,5%
Vegetação Florestal	19,30	1,3%
Outros	2,50	0,2%

Fonte: Estudo de Impacto Ambiental, PCH II

Na Figura 4 está ilustrado o uso e ocupação do solo no entorno do reservatório artificial da PCH II, onde estão delimitados os principais usos do solo para que sejam mantidas as condições para conservação da qualidade da água, do visual paisagístico, da ocupação ordenada e da estabilidade geológica das encostas.

Figura 4 - Uso e Ocupação do Solo no Entorno do Reservatório Artificial, PCH II



Fonte: Relatório Ambiental Simplificado, PCH II

3.4.3. Características locais

A qualidade da água pode ser influenciada naturalmente por meio da geologia, clima, vegetação, solo da bacia hidrográfica em que o corpo hídrico está inserido, ou pela influência antrópica, através de atividades relacionadas ao crescimento populacional e industrial, nas margens de rios e tributários, que promovem

modificações das condições naturais da água (TUNDISI; TUNDISI, 2008). Visto que a implantação dos barramentos produziu um novo contexto ambiental tanto nas águas quanto nas áreas de entorno do reservatório, se faz necessária a análise do uso e ocupação do solo e verificação da adequada operação do empreendimento, referente à realidade ambiental, social e econômica da região inserida.

Para avaliação deste item serão analisados os dados contidos nos PACUERAs e os EIAs (Estudo de Impacto Ambiental) dos empreendimentos, visto que estes documento contém a elaboração do ordenamento do uso antrópico do reservatório e de suas áreas marginais, compatibilizando com a legislação vigente e aplicável e com as normas operativas e de segurança, por meio da elaboração de proposta de zoneamento ambiental. Uma vez que os empreendimentos estão localizados em sequência e nas divisas dos mesmos municípios de Barracão e Pinhal da Serra, estado do Rio Grande do Sul, será realizada uma análise conjunta para esta seção do uso e ocupação do solo.

A gestão do empreendimento deve priorizar a eficiente utilização do reservatório, de forma que este cumpra adequadamente tanto as funções específicas de geração de energia, quanto àquelas relacionadas à preservação ambiental e ao controle e mitigação de seus impactos sobre o ambiente. Cabe ao empreendedor a gestão das áreas do reservatório e respectiva Área de Proteção Permanente (APP). Quanto às áreas localizadas no retorno do reservatório que não são de propriedade do empreendedor, cabe à administração municipal e aos demais órgãos públicos atuantes na região e aos proprietários a responsabilidade pelo uso e ocupação do solo neste trecho o qual deve ser utilizado e ocupado conforme diretrizes que contemplem a manutenção de boas condições ambientais e de qualidade da água.

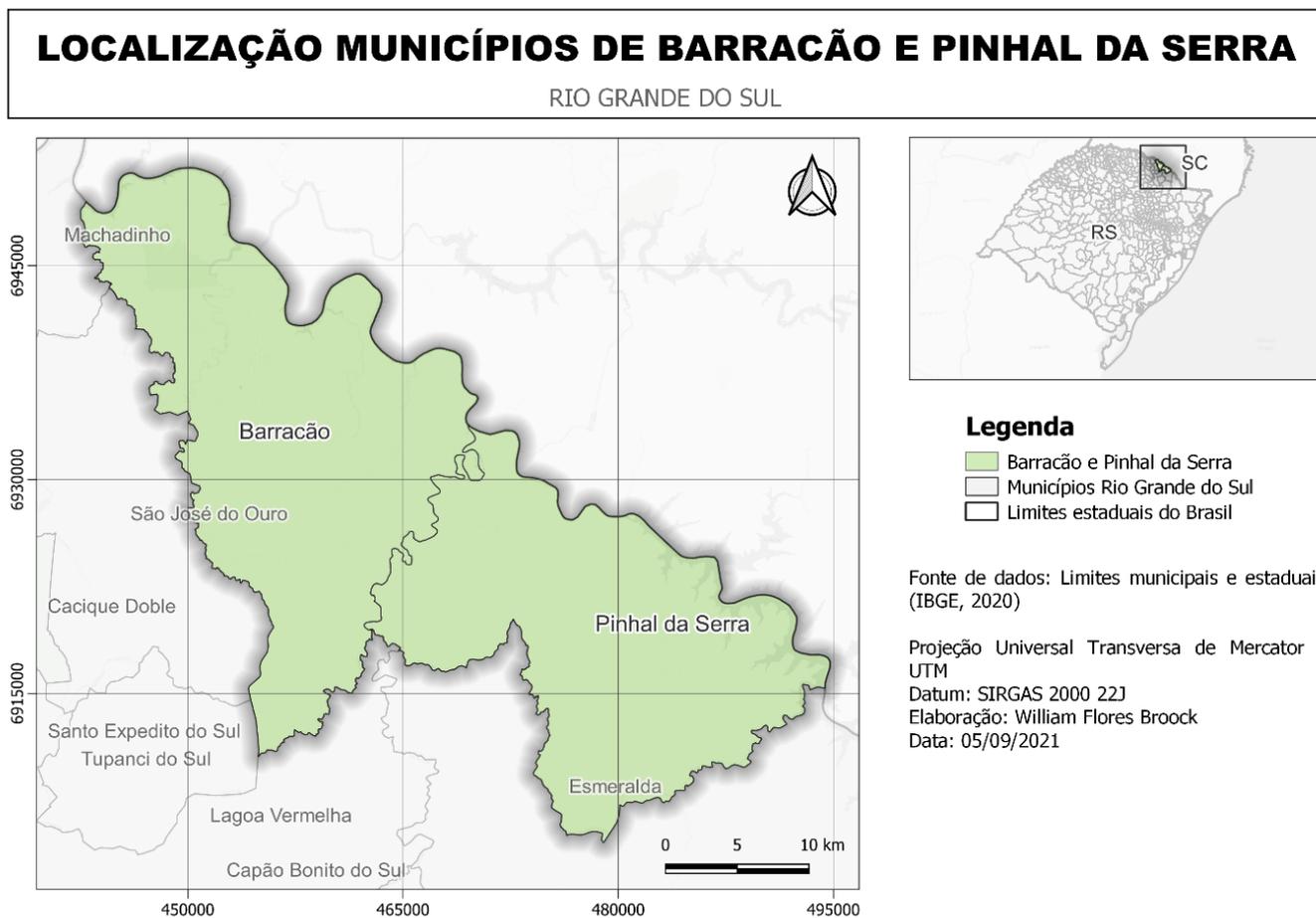
3.4.3.1. População

O município de Barracão foi criado em 30 de maio de 1964 e se instalou em 07 de fevereiro de 1965. Conta com área total de 515,469km² e tem fronteiras ao norte com o estado de Santa Catarina, a oeste com o município de José do Ouro, a leste com o município de Pinhal da Serra e ao sul com os municípios de Lagoa Vermelha e

Esmeralda. Apresenta altitude de 764m, distando 424km da capital do estado, a cidade de Porto Alegre. O município conta com 5.357 habitantes, de acordo com o último censo do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), resultando em uma densidade demográfica de 10,37 hab/km² e analisando a dinâmica populacional nota-se o fenômeno de êxodo rural.

O município de Pinhal da Serra, por sua vez, foi criado em 17 de abril de 1996 e se instalou em 01 de janeiro de 2001. Conta com área total de 438,110km² e tem fronteiras ao norte com o estado de Santa Catarina, a oeste com o município de Barracão, e ao sul e leste com o município de Esmeralda. Apresenta altitude de 840m, distando 310km da capital do estado, a cidade de Porto Alegre. O município conta com 2.130 habitantes, de acordo com o último censo do IBGE, resultando em uma densidade demográfica de 4,86 hab/km².

Figura 5 - Mapa de localização dos municípios



Fonte: Aatoria própria

Tabela 5 - População residente nos municípios de Barracão e Pinhal da Serra, RS

População Residente - 2010			
Município	Total	Urbana	Rural
Pinhal da Serra	2.130	478	1.652
Barracão	5.357	3.037	2.320
Total	7.487	3.515	3.972

Fonte: IBGE (2021).

3.4.3.2. Saneamento Básico

De acordo com o último censo, realizado em 2010, apenas 0,8% da população de Barracão e 0,6% da população de Pinhal da Serra são atendidas pela ligação com a rede geral de esgoto. Referente à destinação dos efluentes gerados, 56% da população de Barracão e 85% da população de Pinhal da Serra fazem uso de fossa rudimentar.

Com relação ao abastecimento de água, a utilização da Rede Geral é predominante, alcançando 64% dos habitantes de Barracão e 73% em Pinhal da Serra. Há também contribuição dos abastecimentos por poço/nascente os quais contribuem com 35% em Barracão e 26% em Pinhal da Serra.

A coleta de resíduos sólidos, por sua vez atende 64% do município de Barracão e 73% do município de Pinhal da Serra. Ainda existe grande participação da queima de lixo para os habitantes não atendidos pela coleta municipal, com participação de 24% dos domicílios em Barracão e 22% em Pinhal da Serra. As porcentagens restantes (12% em Barracão e 5% em Pinhal da Serra) são descartadas de modo irregular.

3.4.3.3. Atividades Econômicas

Na região é amplamente praticada a pecuária, porém não predominantemente para comercialização. A maior parte desta produção é formada pela bovinocultura seguida pelos galináceos. A bovinocultura de leite também é uma atividade utilizada, mesmo que com pouca representatividade.

Quanto à produção agrícola, se destacam as lavouras temporárias de milho, soja e trigo, como as de maior produção e comercialização pelas famílias. Em relação às lavouras permanentes, estas aparecem como principais culturas a uva e o pêssego no município de Barracão e a laranja e maçã no município de Pinhal da Serra.

3.4.3.4. Bacia Hidrográfica

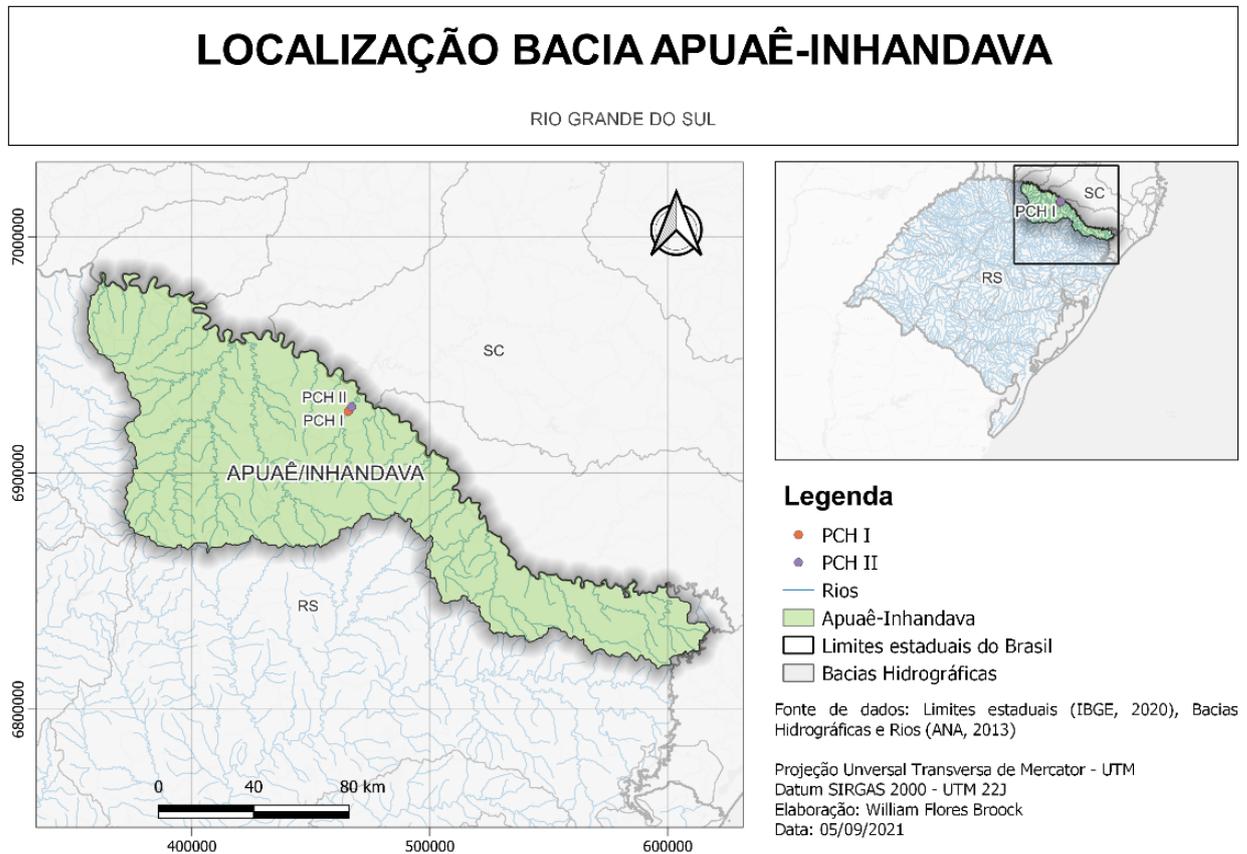
A Bacia Hidrográfica dos rios Apuaê-Inhandava integra a Região Hidrográfica do Uruguai, de acordo com a divisão por regiões adotada no estado do Rio grande do Sul, e localiza-se na porção norte-nordeste do estado, entre as coordenadas geográficas 27°14' a 28°45' de latitude Sul e 50°42' a 52°26' de longitude oeste, fazendo divisa com o estado de Santa Catarina. A sua área de drenagem é de 14.479,14km² e conta com os rios Silveira, Cerquinha, Touros, Santana, Socorro, Bernardo José, Marmeleiro, Inhandava (ou Forquilha), Apuaê (ou Ligeiro), Piracucê e Apuaê Mirim, Suzana e Dourado como seus principais formadores. A bacia possui uma característica hidrográfica singular visto que todos os seus rios correm paralelos em direção ao rio Uruguai, portanto a mesma não possui o formato clássico com apenas um exutório. Nesta bacia são abrangidos, total ou parcialmente, 50 municípios, sendo 19 destes inseridos totalmente nos limites da bacia hidrográfica.

A bacia hidrográfica tem suas nascentes na Serra Geral, com altitudes máximas no seu limite Sul da ordem de 960,00m nos seus divisores. Segundo informações do Plano da Bacia Hidrográfica dos Rios Apuaê-Inhandava (2021), o principal uso da água nesta bacia é para abastecimento humano, a dessedentação animal e a geração de energia elétrica. O uso do solo é destinado principalmente às áreas agrícola e aos

remanescentes de vegetação, com apenas 0,8% da área total da bacia correspondendo à áreas urbanas.

O rio Bernardo José, onde ambos os empreendimentos estão alocados, está situado na Unidade de Planejamento e Gestão (UGP) Bernardo José, a qual conta com 15% da disponibilidade hídrica total da Bacia Hidrográfica Apuaê-Inhandava. Este Rio conta com um balanço hídrico de 4,36 m³/s e uma baixa taxa de uso (0,8%), ilustrando uma situação bastante confortável. O rio Bernardo José conta com o enquadramento do corpo hídrico, conforme diretrizes da Resolução CONAMA 357/2005, de Classe 2, conforme Resolução CRH/RS nº 342, de 11 de setembro de 2019.

Figura 6 - Localização Bacia Apuaê-Inhandava e empreendimentos estudados



Fonte: Autoria própria

3.5. PARÂMETROS PARA A DETERMINAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA

Levando em conta a complexidade dos aspectos ambientais, a presença de diversas variáveis que afetam as propriedades da qualidade da água e os diversos usos múltiplos a que os corpos hídricos estão submetidos, se faz imperativo que sejam realizadas análises multifacetárias, de modo com que os estudos limnológicos possam refletir o dinamismo atrelado à utilização dos recursos hídricos. Esta dupla vertente apresenta-se como um desafio permanente de gerar indicadores e índices que tratem um número cada vez maior de informações, de forma sistemática e acessível, para os tomadores de decisão (CETESB, 2017).

Os índices e indicadores ambientais nasceram como resultado da crescente preocupação social com os aspectos ambientais do desenvolvimento, processo que requer um número elevado de informações em graus de complexidade cada vez maiores. Com relação à qualidade da água, estes podem ser empregados para indicar a qualidade para abastecimento doméstico, preservação da comunidade aquática e ainda procurando abranger as duas questões (COUILLAR e LEFEBVRE, 1985).

3.5.1. IQA

A utilização do IQA é de grande utilidade para transmitir a informação a respeito da qualidade da água ao público em geral de uma maneira resumida e de fácil entendimento, visto que possui faixas de classificação bem definidas. Sua uniformidade de critérios para classificação dos recursos hídricos permite ainda, desde que utilizadas as mesmas variáveis no seu cálculo, a comparação relativa entre sistemas hídricos diversos.

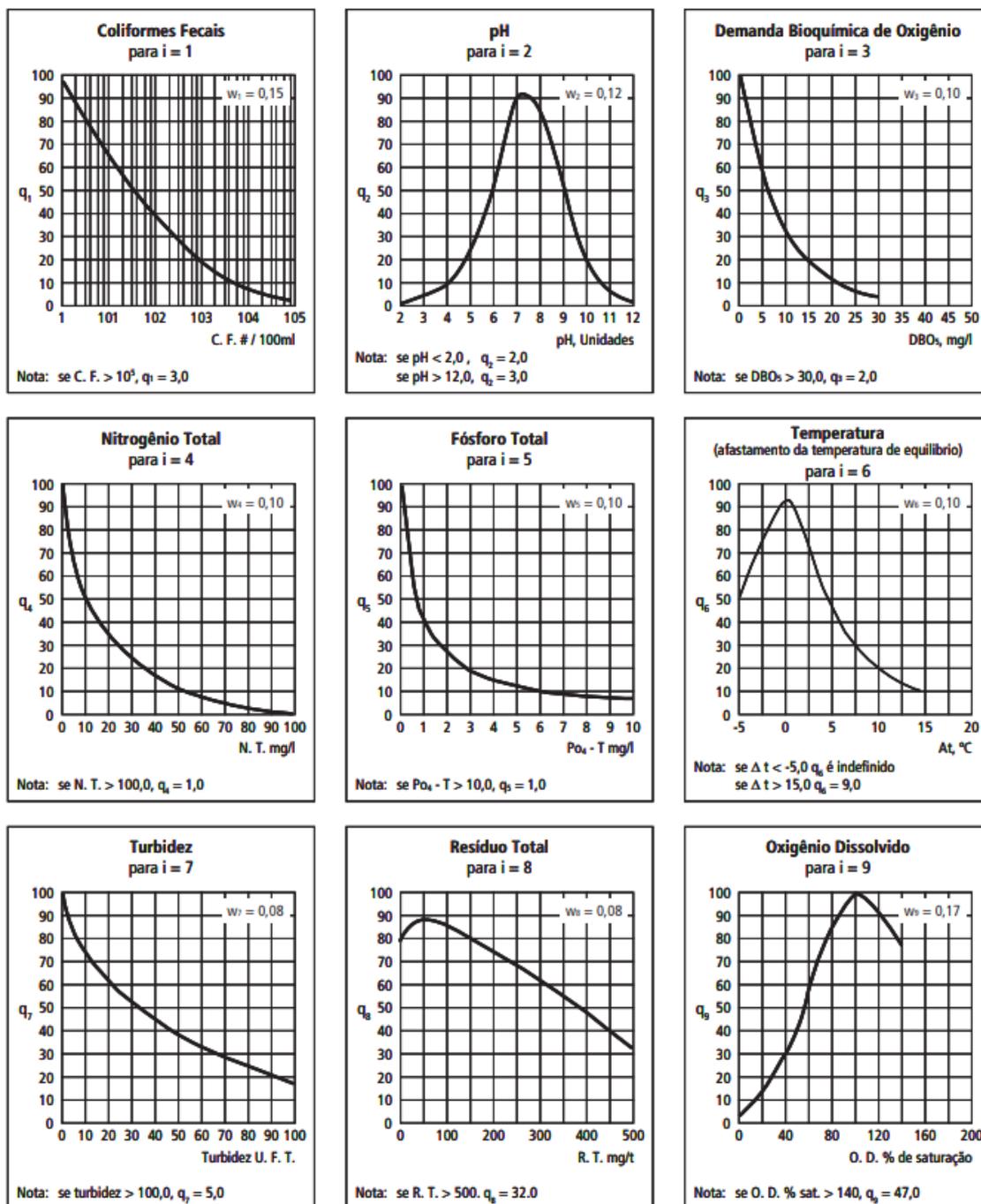
O IQA – Índice de Qualidade das Águas atualmente é utilizado em grande escala por todo território nacional, em conjunto com suas adaptações elaboradas em esfera estadual, de forma a melhor refletir a realidade local. Este índice foi primeiramente desenvolvido pela “Companhia Ambiental do Estado de São Paulo” (CETESB), a partir da adaptação para o cenário brasileiro, de um estudo realizado na década de 1970 pela “National Sanitation Foundation” (NSF) dos Estados Unidos da América.

O IQA NSF, desenvolveu-se mediante uma pesquisa, usando um painel de 142 pessoas distribuídas por todos os Estados Unidos, com experiência em diversos aspectos da gestão da qualidade da água. Isto foi realizado, a fim de minimizar os problemas associados à arbitrariedade do julgamento de um só autor ou de uma área geográfica específica (BROWN et al., 1970). Para a elaboração deste índice foram enviados três questionários aos membros do painel, pedindo, dentre outras coisas que os mesmos considerassem as variáveis que teriam maior destaque para a inclusão

nesta equação, assim como a realização da pontuação dos seus respectivos graus de importância para a qualidade global da água.

Por fim, foi criada a equação do Índice de Qualidade da Água, assim como as cinco classes de qualidade para o enquadramento dos valores finais obtidos através do cálculo do IQA. Para cada variável escolhida, foram ainda estabelecidas curvas médias de variação da qualidade das águas de acordo com a importância de cada parâmetro para o cálculo, bem como seu peso relativo correspondente, conforme apresentados na Figura 7.

Figura 7 – Curvas Médias de Variação de Qualidade das Águas.



Fonte: CETESB (2017)

Originalmente, foram adotados pela NSF na década de 1970, os parâmetros e pesos relativos demonstrados na Tabela 6 para a realização do cálculo do IQA.

Tabela 6 - Parâmetros e pesos relativos do IQA NSF

Parâmetro	Peso relativo
Oxigênio dissolvido (% saturação)	0,17
Coliformes Termotolerantes	0,15
pH	0,12
Demanda Química de Oxigênio	0,10
Temperatura	0,10
Fosfato	0,10
Nitrato	0,10
Turbidez	0,08
Sólidos totais	0,08

Fonte: CETESB (2017)

Ainda, foram criadas cinco classes de qualidade para o enquadramento dos valores finais obtidos através do cálculo do IQA. Estes valores estão descritos na

Tabela 7:

Tabela 7 - Classificação de qualidade para o IQA NSF

Categoria	Ponderação
EXCELENTE	$91 \leq \text{IQA} \leq 100$
BOM	$71 \leq \text{IQA} \leq 90$
REGULAR	$51 \leq \text{IQA} \leq 70$
RUIM	$26 \leq \text{IQA} \leq 50$
MUITO RUIM	$\text{IQA} \leq 25$

Fonte: CETESB (2017)

3.5.1.1. IQA CETESB

A metodologia adaptada pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo utiliza os mesmos parâmetros originais selecionados pela NSF para a obtenção do Índice de Qualidade da Água, com exceção do nitrato total e fosfato total, analisando de forma alternativa, a concentração de nitrogênio total e fósforo total.

Tabela 8 - Parâmetros e pesos relativos do IQA CETESB

Parâmetro	Peso relativo
Oxigênio dissolvido (% saturação)	0,17
Coliformes Termotolerantes	0,15
pH	0,12
Demanda Química de Oxigênio	0,10
Temperatura	0,10
Fósforo Total	0,10
Nitrogênio Total	0,10
Turbidez	0,08
Sólidos totais	0,08

Fonte: CETESB (2017)

As equações desenvolvidas pela NSF levam em consideração as características dos corpos de água e variações climáticas dos Estados Unidos, sendo a variação de temperatura de equilíbrio o principal parâmetro afetado. Como no caso do Brasil, os ambientes não recebem cargas térmicas muito diferentes, as equações não condizem com a realidade brasileira, pois a variação da temperatura de equilíbrio é próxima de zero, então as metodologias da CETESB e FEAM-IGAM atribuem uma nota fixa ao parâmetro Variação de Temperatura de 94 e 93 respectivamente (BRASIL, 2005).

A partir dos valores individuais obtidos para cada variável na Tabela 8 destacada e aplicando a equação do IQA CETESB obtida por meio de regressão matemática e demonstrada na Tabela 16, pode-se obter como resultado um valor absoluto. Por fim, é possível então determinar a qualidade das águas brutas, de acordo com as faixas representadas na Tabela 9 abaixo.

Tabela 9 – Classificação de qualidade para o IQA CETESB

Categoria	Ponderação
ÓTIMA	$79 < \text{IQA} \leq 100$
BOA	$51 < \text{IQA} \leq 79$
REGULAR	$36 < \text{IQA} \leq 51$
RUIM	$19 < \text{IQA} \leq 36$
PÉSSIMA	$\text{IQA} \leq 19$

Fonte: CETESB (2017)

3.5.1.2. IQA COMITESINOS

Paralelamente ao Índice de Qualidade de Água (IQA) desenvolvido pela CETESB, será também avaliada uma variação deste índice, esta por sua vez, desenvolvida pelo “Comitê de Preservação, Gerenciamento e Pesquisa da Bacia do Rio dos Sinos” (COMITESINOS) em 1990 e amplamente utilizada na região de estudo (Estado do Rio Grande do Sul).

O IQA COMITESINOS utiliza as mesmas fórmulas matemáticas e curvas médias de variação do IQA CETESB, porém substitui os valores de entrada das variáveis nitrogênio e fósforo por nitrato e fosfato respectivamente, conforme é originalmente utilizado no IQA NSF. Ainda, esta adaptação desconsidera o desvio da temperatura da água que, de acordo com o comitê, é indiretamente considerada através da saturação de oxigênio dissolvido. Frente à exclusão da variável mencionada anteriormente e ao fato de que o somatório de todos os pesos deve ser sempre igual a 1,0 (um) para manter a integridade dos cálculos, o peso desta foi proporcionalmente distribuído entre os demais parâmetros. Os pesos relativos a serem adotados para este cálculo são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Parâmetros e pesos relativos do IQA COMITESINOS

Parâmetros	Pesos Relativos
Oxigênio Dissolvido (de saturação – O _{Dsat})	0,19
Coliformes Termotolerantes	0,17
pH	0,13
Demanda Bioquímica de Oxigênio	0,11
Fosfato Total	0,11
Nitrato	0,11
Turbidez	0,09
Sólidos Suspensos	0,09

Fonte: COMITESINOS (1990)

A partir do resultado de IQA COMITESINOS obtido, é possível então determinar a classificação da qualidade da água de acordo com as faixas representadas de IQA. Para esta adaptação do índice, utiliza-se uma classificação diferente daquelas anteriormente demonstradas. Na Tabela 11 estão ilustrados os valores para as faixas de classificação do IQA COMITESINOS.

Tabela 11 – Classificação de qualidade para o IQA COMITESINOS

Categoria	Ponderação
EXCELENTE	$91 \leq \text{IQA} \leq 100$
BOM	$71 \leq \text{IQA} \leq 90$
REGULAR	$51 \leq \text{IQA} \leq 70$
RUIM	$26 \leq \text{IQA} \leq 50$
MUITO RUIM	$\text{IQA} \leq 25$

Fonte: COMITESINOS (1990)

3.5.2. IET

O Índice do Estado Trófico (IET) tem por finalidade classificar corpos d'água em diferentes graus de trofia, ou seja, avalia a qualidade da água quanto ao enriquecimento por nutrientes e seu efeito relacionado ao crescimento excessivo das algas e cianobactérias. (CETESB, 2017). O Índice do Estado Trófico (IET) tem por objetivo classificar corpos hídricos em diferentes graus de trofia, avaliando a qualidade da água quanto ao enriquecimento por nutrientes. Dessa forma, pode fornecer subsídios para a formulação de planos de manejo e gestão de ecossistemas aquáticos, por meio de estratégias que visem à sustentabilidade dos recursos hídricos (LAMPARELLI, 2004).

Na interpretação dos resultados, os pontos analisados do ambiente aquático serão classificados conforme os seis graus de trofia para o Índice de Estado Trófico de reservatórios, estes descritos na Tabela 12.

Tabela 12 - Classificações para o Índice de Estado Trófico para reservatórios

ESTADO TRÓFICO	CRITÉRIO	CARACTERÍSTICAS
Ultraoligotrófico	$IET \leq 47$	Corpos d'água limpos, de produtividade muito baixa e concentrações insignificantes de nutrientes que não acarretam prejuízos aos usos da água.
Oligotrófico	$47 \leq IET \leq 52$	Corpos d'água limpos, de baixa produtividade, em que não ocorrem interferências indesejáveis sobre os usos da água, decorrentes da presença de nutrientes.
Mesotrófico	$52 < IET \leq 59$	Corpos d'água com produtividade intermediária, com possíveis implicações sobre a qualidade da água, mas em níveis aceitáveis, na maioria dos casos.
Eutrófico	$59 < IET \leq 63$	Corpos d'água com alta produtividade em relação às condições naturais, com redução da transparência, em geral afetados por atividades

		antrópicas, nos quais ocorrem alterações indesejáveis na qualidade da água decorrentes do aumento da concentração de nutrientes e interferências nos seus múltiplos usos.
Supereutrófico	$63 < IET \leq 67$	Corpos d'água com alta produtividade em relação às condições naturais, de baixa transparência, em geral afetados por atividades antrópicas, nos quais ocorrem com frequência alterações indesejáveis na qualidade da água, como a ocorrência de episódios florações de algas, e interferências nos seus múltiplos usos
Hipereutrófico	$IET < 67$	Corpos d'água afetados significativamente pelas elevadas concentrações de matéria orgânica e nutrientes, com comprometimento acentuado nos seus usos, associado a episódios florações de algas ou mortandades de peixes, com consequências indesejáveis para seus múltiplos usos, inclusive sobre as atividades pecuárias nas regiões ribeirinhas.

Fonte: CETESB (2017)

3.5.3. IQAR

A instalação de barramentos em rios altera o fluxo de água podendo provocar modificações na qualidade ambiental do recurso hídrico, perturbações ocasionadas por atividades antrópicas, alterando os mecanismos internos, incidindo diretamente no aumento da vulnerabilidade do reservatório. Como consequência destas alterações, pode ocorrer a redução da qualidade da água, devido ao acréscimo de nutrientes, elevando a produtividade do sistema.

O Índice de Qualidade da Água de Reservatórios (IQAR) foi elaborado pelo Instituto Ambiental do Paraná – IAP (Fornarolli-Andrade et al., 1997), através de uma adaptação desenvolvida pela “National Sanitation Foundation” dos Estados Unidos da América, com o objetivo de verificar a degradação da qualidade da água em reservatórios. Esta metodologia estabelece seis classes de qualidade em relação ao seu grau de degradação:

Tabela 13 - Valores de classificação do IQAR

Valor do IQAR	Qualificação
0 – 1,50	Não impactado a muito pouco degradado
1,51 – 2,50	Pouco degradado
2,51 – 3,50	Moderadamente degradado
3,51 – 4,50	Criticamente degradado a poluído
4,51 – 5,50	Muito poluído
> 5,51	Extremamente poluído

Fonte: ANA (2015)

Para a utilização deste índice foram selecionados pontos amostrais localizados imediatamente a montante do barramento, de acordo com diferentes profundidades (superfície, meio e fundo). Foram então atribuídos pesos específicos para cada variável a ser considerada, de acordo com a Tabela 14.

Tabela 14 - Parâmetros utilizados para o cálculo do IQAR

PARÂMETRO	PESO
Déficit de oxigênio dissolvido (%)	17
Fósforo Total (mg/L)	12
Nitrogênio Inorgânico Total (mg/L)	8
Clorofila-a (mg/m ³)	15
Profundidade Secchi (m)	12
Demanda Química de Oxigênio (mg/L)	12
Cianobactérias	8
Tempo de Residência (dias)	10
Profundidade Média (m)	6

Fonte: ANA (2015)

3.6. ESTADO DA ARTE NO USO DE ÍNDICES AMBIENTAIS

Segundo Santos (2004), um índice representa uma forma de percepção da realidade que se dá através de um conjunto de dados representativos de parâmetros capazes de traduzir o estado de um ambiente. O Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2009) classifica índices como sendo informações quantificadas, de cunho científico e de fácil compreensão, utilizadas como ferramentas de avaliação de determinados fenômenos ao longo do tempo. De modo semelhante, a Agência Europeia de Meio Ambiente (EEA) afirma que um índice é um valor representativo de um fenômeno, o qual quantifica a informação mediante a agregação de diferentes dados, dando lugar à informação sintetizada.

Os índices ambientais começaram a ser utilizados durante a década de 70 e 80, como resultado de esforços de governos e organizações internacionais na elaboração e divulgação dos primeiros Relatórios sobre o Estado do Ambiente (FRANCA, 2001). Sendo o governo holandês o pioneiro na adoção de índices ambientais, em 1989, para avaliar os resultados da implementação do Plano de Política Ambiental Nacional (HAMMOND et al, 1995).

Deste sua criação, os índices de qualidade ambiental vêm tendo larga aplicação e divulgação na sociedade, pela sua facilidade na sintetização de informações. Porém, devido a esta popularidade, foram criadas diversas adaptações, na tentativa de maximizar sua eficácia e adequar os resultados à realidade de cada região. Em síntese, os índices são tão variados quanto os fenômenos, processos e fatos que eles monitoram, provêm de diferentes fontes e têm três funções básicas – quantificação, simplificação da informação e comunicação (MARANHÃO, 2007). De forma similar, a ANA (2012) afirma que existe uma grande variedade de índices de qualidade ambiental, os quais expressam aspectos parciais, não existindo, portanto, um índice único que sintetize todas as variáveis ambientais. Estudos recentes conduzidos por Shwetank et al (2020), e Li et al (2016) afirmam que os índices de Qualidade da Água (IQA-NSF) são imprecisos e, conseqüentemente não podem ser utilizados como fonte de informação de forma isolada. Ainda, Chang (2001) e Oladipo et al (2021), concluem que as metodologias convencionais dão margem à imprecisão

inerente, com dificuldades ao descrever as condições integradas à qualidade da água no que diz respeito à vários constituintes químicos e biológicos, nutrientes e qualidades estéticas. Pelo seu caráter reducionista, em que vários itens de qualidade são convertidos em uma nota ou avaliação única, os índices são bastante polêmicos, uma vez que mascaram ou atenuam a multiplicidade de condições que ocorrem em um corpo hídrico. Por outro lado, a capacidade de síntese proporcionada por um índice, desde que entendidas suas limitações intrínsecas, é de grande importância para a comunicação com o público (LERMONTOV, 2009).

Destaca-se, ainda, que não se deve fazer uso exclusivo de índices de qualidade das águas em detrimento de uma análise mais detalhada dos dados gerados em um monitoramento ambiental, muito menos considerar somente um índice como uma ferramenta gerencial para os corpos d'água já que os mesmos apresentam características distintas a cada trecho, devido a sua vazão, ocupação das margens, existência de fontes de poluição, entre outros (COIMBRA, 2011). Analisando estas limitações na aplicação dos Índices de Qualidade Ambiental, Hermann e Shenk (2021), encontraram ainda lacunas entre os índices ambientais existentes e a possibilidade de aplicação destes em grande escala devido à particularidades distintas de cada localidade. De forma complementar, Dobruskes e Efthymiou (2021), recomendam que os acadêmicos não considerem os índices ambientais como garantidos, visto que são uma ferramenta de transição entre o conhecimento científico e os fundamentos político-administrativos.

Como forma de aprimoramento às metodologias existentes, Liu et al, (2021) sugerem que os índices ambientais não se limitem à quantificação da poluição, devendo estes também serem baseados em percepções subjetivas, visto que, de acordo com seu estudo, os índices existentes não refletem as percepções dos habitantes locais. Ainda, Cao et al, (2021) questionaram o motivo índices ambientais existentes não considerarem de forma simultânea as questões quali-quantitativas da água, sugerindo, portanto, um novo modelo que possa avaliar o cenário de forma mais abrangente.

Portanto, por mais atrativas que sejam as vantagens provenientes da utilização das diversas metodologias de índices de qualidade ambiental, estes devem ser

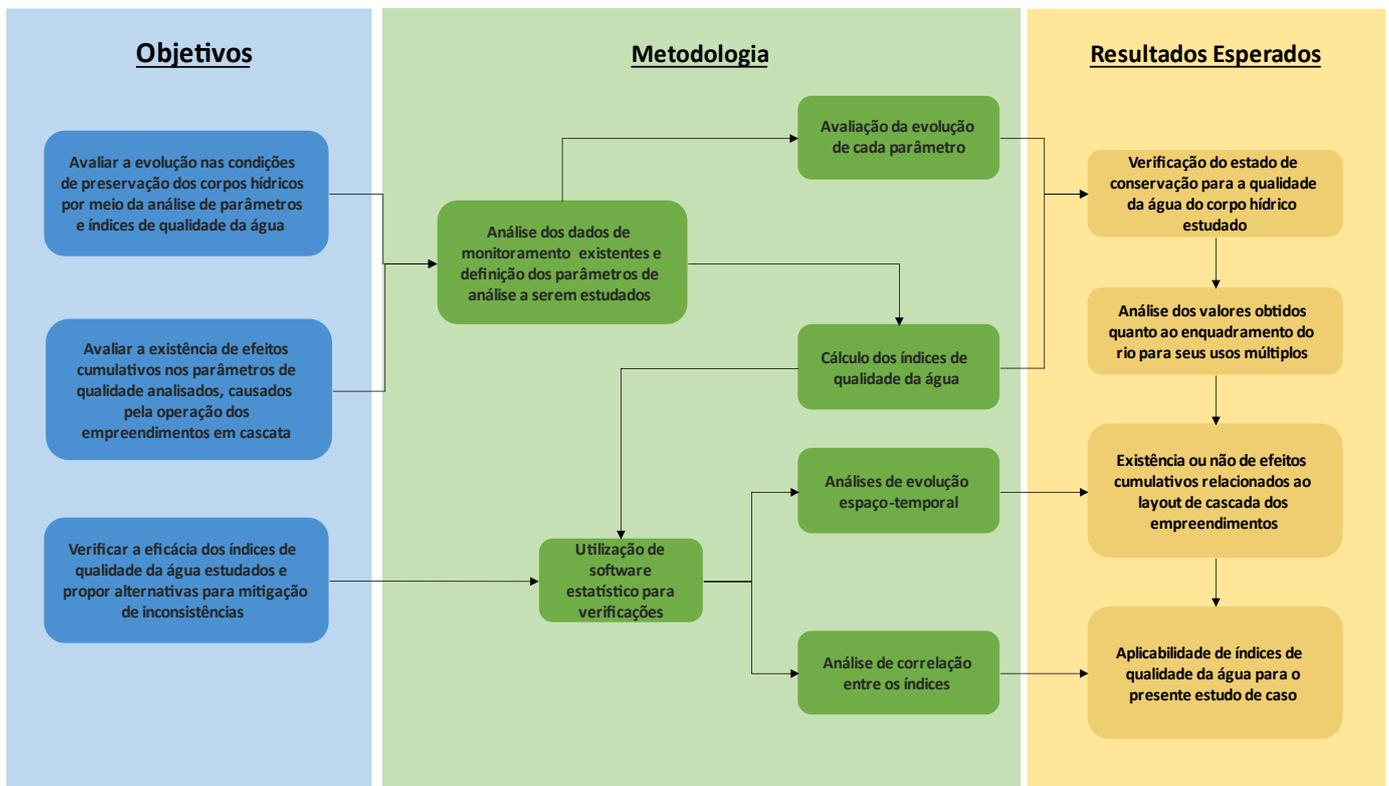
utilizados com cautela. Isto deve-se ao fato de que para simplificação da análise de diversas características físicas, químicas e biológicas dos ambientes estudados, certos parâmetros são suprimidos, os quais podem conter informações pertinentes para o estudo de caso.

4. METODOLOGIA

4.1. FLUXOGRAMA METODOLÓGICO

A Figura 8 apresenta os principais passos metodológicos empregados neste estudo.

Figura 8 - Fluxograma metodológico



Fonte: Autoria própria

4.2. DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS ADOTADOS

A preocupação na definição dos parâmetros utilizados no âmbito deste trabalho originou-se em função do grande número de substâncias com capacidade de alterar o equilíbrio do ecossistema aquático, sendo grande partes destas analisados pelas campanhas de monitoramento, bem como sua variação ao longo de todo o período já registrado. Desta forma, procurou-se então selecionar os parâmetros mais representativos, os quais estariam alinhados com os objetivos apresentados pelo presente estudo, sendo eles: Avaliação da condição de preservação dos corpos hídricos; Avaliação da Existência de efeitos cumulativos entre os empreendimentos; verificar a eficácia da utilização dos índices de qualidade ambiental propostos.

De acordo com a justificativa apresentada, foram utilizados para a determinação da qualidade da água no entorno dos empreendimentos os seguintes parâmetros: Clorofila-a; Coliformes Termotolerantes; Déficit de Oxigênio; Demanda Bioquímica de Oxigênio; Fosfato; Nitrato; Oxigênio Dissolvido; Resíduo Total e Turbidez. A respectiva utilização dos parâmetros apresentados e seus métodos de análise estão sumarizados conforme Tabela 15 abaixo.

Tabela 15 - Parâmetros utilizados para os cálculos dos índices ambientais

Índice	Parâmetro	Unidade	Método de Análise
IQA	Coliformes Termotolerantes	NMP/100mL	SMEWW 9223 B
	Demanda Bioquímica de Oxigênio	mgO ₂ /L	SMEWW 5210 D
	Nitrato	mg/L	SMEWW 4110 B
	Fosfato	mg/L	SMEWW 4500 P E
	Turbidez	NTU	SMEWW 2130 B
	pH	-	Peagâmetro (Direto)
	Sólidos Suspensos	mg/L	SMEWW 2540 B
	Oxigênio Dissolvido	mg/L	Oxímetro (Direto)
IET	Clorofila-a	mg/m ³	SMEWW 10200 H
	Fósforo Total	mg/L	SMEWW 4500 P E
IQAR	Déficit de Oxigênio	%	Oxímetro (Direto)
	Fósforo Total	mg/L	SMEWW 4500 P E
	Nitrogênio Inorgânico Total	mg/L	EPA 350.2
	Clorofila-a	mg/m ³	SMEWW 10200 H
	Profundidade Secchi	m	-

	Demanda Bioquímica de Oxigênio	mg/L	SMEWW 5210 D
	Cianobactérias	-	-
	Tempo de Residência	dias	-
	Profundidade Média	m	-

Fonte: Autoria própria com dados de ABG (2020)

4.3. AVALIAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DA QUALIDADE DA ÁGUA

Conforme descrito na Tabela 15, serão analisados no presente estudo apenas os parâmetros relacionados ao cálculo dos índices ambientais de qualidade da água: Índice de Qualidade da Água, Índice de Qualidade da Água de Reservatórios e Índice de Estado Trófico.

4.3.1. Índices Ambientais

De modo complementar à análise multivariada dos parâmetros ambientais, serão também calculados índices de qualidade ambiental, para realização do comparativo entre os resultados obtidos nas duas etapas, verificando as deficiências e oportunidades de melhoria para cada método de avaliação.

4.3.1.1. *Índice de qualidade da Água COMITESINOS (IQA)*

Atualmente, o IQA é definido como sendo o produtório ponderado das qualidades de água correspondentes às nove variáveis selecionadas para integrar o índice de acordo com a seguinte fórmula:

Equação 1 - Índice de Qualidade da Água

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

Onde:

- **IQA** = Índice de Qualidade das Águas (varia entre 0 – 100);
- **q_i** = qualidade do *i*-ésimo parâmetro (varia entre 0 – 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 (varia entre 0 – 1), atribuído em função da sua importância para conformação global de qualidade;
- **n** = número de variáveis que entram no cálculo do IQA;

Neste trabalho, para determinação dos valores de q_i , e aplicação das curvas médias de variação, foram utilizadas como base as regressões matemáticas apresentadas por TONIOLO (2020), as quais foram calculadas inicialmente no software livre IQAData Versão 2010 e posteriormente transferidos ao software Microsoft Excel. Estas equações estão descritas na Tabela 16:

Tabela 16 - Fórmulas para determinação do IQA. Fonte: TONIOLO, 2020.

Parâmetro	Limite mínimo (>)	Limite máximo (≤)	Equação de q_i
Log ₁₀ (coliformes termotolerantes)	0	1	100 - 33*logC
	1	5	100 - 37,2*logC + 3,60743*logC ²
	5		3
pH	0	2	2
	2	4	13,6 - 10,6*pH + 2,4364*pH ²
	4	6,2	155,5 - 77,36*pH + 10,2481*pH ²
	6,2	7	-657,2 + 197,38*pH - 12,9167*pH ²
	7	8	-427,8 + 142,05*pH - 9,695*pH ²
	8	8,5	216 - 16*pH
	8,5	9	1415823*EXP(-1,1507*pH)
	9	10	228 - 27*pH
	10	12	633 - 106,5*pH + 4,5*pH ²
	12	14	3
DBO	0	5	99,96*EXP(-0,1232728*C)
	5	15	104,67 - 31,5463*LOG10(C)
	15	30	4394,91*C ^{-1,99809}
	30		2
Nitrogênio total (mgN/L)	0	10	100 - 8,169*C + 0,3059*C ²
	10	60	101,9 - 23,1023*LOG10(C)
	60	100	159,3148*EXP(-0,0512842*C)
	100		1
Fósforo (mgPO4/L)	0	1	99*EXP(-0,91629*C)
	1	5	57,6 - 20,178*C + 2,1326*C ²
	5	10	19,8*EXP(-0,13544*C)
	10		5
Diferença de temperatura			94 (assumido o valor constante de 94 pela CETESB, por se considerar que, nas condições brasileiras, a temperatura dos corpos d'água não se afasta da temperatura de equilíbrio)
Turbidez (UNT)	0	25	100,17 - 2,67*Turb + 0,03775*Turb ²
	25	100	84,76*EXP(-0,016206*Turb)
	100		5
Sólidos totais (mg/L)	0	150	79,75 + 0,166*C - 0,001088*C ²
	150	500	101,67 - 0,13917*C
	500		32
Percentagem de saturação de OD (%)	0	50	3 + 0,34*(%sat) + 0,008095*(%sat) ² + 1,35252*0,00001*(%sat) ³
	50	85	3 - 1,166*(%sat) + 0,058*(%sat) ² - 3,803435*0,0001*(%sat) ³
	85	100	3 + 3,7745*(%sat) ^{0,704889}
	100	140	3 + 2,9*(%sat) - 0,02496*(%sat) ² + 5,60919*0,00001*(%sat) ³
	140		3+47
		Concentração de saturação de OD (mg/L)	
	Percentagem de saturação (%)		100*OD/C _s

Fonte: TONIOLO (2020)

4.3.1.2. Índice de Estado Trófico (IET)

Neste estudo, o cálculo seguiu a metodologia proposta pela Agência Nacional das Águas (ANA, 2015), utilizando como conte de dados os resultados obtidos nas

campanhas de monitoramento de qualidade da água, realizadas de forma recorrente em ambos os empreendimentos.

O cálculo foi realizado para o ambiente amostral de reservatórios artificiais, como demonstrado nas equações 2 e 3.

Equação 2 - Índice de Estado Trófico para clorofila-a

$$IET (CL) = 10 * \left(6 - \left(\frac{(0,92 - 0,34 * (\ln CL))}{\ln 2} \right) \right)$$

Equação 3 - Índice de Estado Trófico para fósforo total

$$IET (PT) = 10 * \left(6 - \left(\frac{(1,77 - 0,42 * (\ln PT))}{\ln 2} \right) \right)$$

Onde:

CL = Concentração de clorofila-a, em µg/L-1;

PT = Concentração de fósforo total, em µg/L-1;

ln = Logaritmo natural.

Após a obtenção dos valores parciais, se faz necessário o cálculo da média aritmética simples dos índices para obtenção do IET Total conforme ilustrado na Equação 4.

Equação 4 - Índice de Estado Trófico Total

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

Onde:

IET (PT) = Índice de Estado Trófico determinado para fósforo total;

IET (CL) = Índice de Estado Trófico determinado para clorofila-a;

4.3.1.3. Índice de Qualidade da Água de Reservatórios (IQAR)

Para este trabalho, devido à ausência de informações específicas referentes às coletas de amostras, foram utilizados os valores de IQAR presentes no relatório de monitoramento estudado, sendo estes previamente calculados pela empresa responsável. O cálculo do IQAR se dá pela fórmula descrita na

Equação 5.

Equação 5 - Índice de Qualidade da Água em Reservatórios

$$IQAR = \sum (w_i * q_i)$$

Onde:

w_i = pesos calculados para as variáveis “i”;

q_i = classes de qualidade de água em relação a variável “i”, q pode variar de 1 a 6;

4.4. COLETA E ANÁLISE DE DADOS

Para avaliar a concentração e magnitude dos parâmetros físico, químicos e biológicos das águas contidas na área de influência de ambos os barramentos, foram utilizados dados provenientes de relatórios de estudos ambientais financiados pela gestora do empreendimento, como forma de apresentar os resultados das campanhas de monitoramento de qualidade das águas à Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler (FEPAM), órgão responsável pelo licenciamento ambiental no estado do Rio Grande do Sul.

4.4.1. Pontos Amostrais

As etapas de coleta e análise das amostras de água foram realizadas ao longo de sete anos, sendo estes entre 2013 e 2020, por meio de estudos de qualidade da água realizados pelo empreendedor como forma de atendimento às condicionantes ambientais impostas pelo licenciamento ambiental. Portanto, serão utilizados dados provenientes destas campanhas de monitoramento, as quais utilizaram oito pontos amostrais previamente definidos, sendo quatro pontos para cada empreendimento.

Os pontos amostrais foram instalados estrategicamente em locais com características distintas quanto ao regime hídrico (distinções estas causadas pela implementação dos barramentos). As descrições dos pontos são as seguintes: Início do Reservatório; Montante do Barramento; Jusante da Casa de Força e Jusante do Barramento. Desta forma é possível realizar a análise da evolução dos parâmetros de qualidade da água ao longo de sua passagem pelo empreendimento.

As amostras coletadas serviram como dados de entrada para a análise da qualidade da água realizada por este estudo, correspondendo às variáveis físicas, químicas e biológicas da água. As referidas amostras foram tratadas de acordo com as normas e metodologias estabelecidas para coleta, armazenamento e transporte no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* os AWWA, 23ª Edição (APHA/AWWA/WEF, 2017).

4.4.1.1. Estações de amostragem no reservatório da PCH I

Conforme mencionado, o empreendimento conta com quatro pontos de amostragem, os quais são utilizados para a realização das campanhas de monitoramento de qualidade da água. Na Tabela 17 estão descritos os pontos, sua localização e características gerais do ambiente em que se encontra.

Tabela 17 - Pontos de Amostragem PCH I

Ponto	Localização	Coordenadas (UTM)	Característica do Ambiente
P1	Início do Reservatório	464890.13 mE 6925578.82 mS	Transição entre o ambiente lótico e lêntico; com mata ciliar preservada, porém a atividade de pecuária está presente em determinados locais.
P2	Montante do Barramento	465742.67 mE 6926079.49 mS	Ambiente intermediário, com margens distintas: a margem esquerda apresenta vegetação conservada e em estágio secundário de regeneração e a direita apresenta-se em fase de reflorestamento.
P3	Jusante do Canal de Fuga	467050.00 mE 6926705.00 mS	Na confluência entre o rio Bernardo José e a vazão turbinada; apresenta vegetação marginal conservada.
P4	Jusante do Barramento	465720.83 mE 6925882.48 mS	Na área de vazão reduzida; local de difícil acesso devido ao relevo, fator que também impossibilita o uso e ocupação do solo nas áreas de entorno; local cercado por vegetação densa.

Fonte: ABG (2020)

Na Figura 9 estão ilustradas as localizações dos pontos de amostragem mencionados pela Tabela 17. O correto entendimento das respectivas localidades se faz de grande importância no momento de análise de dados, visto que estas informações serão utilizadas para elaboração de hipóteses quando às possíveis variações encontradas na qualidade da água.

Figura 9 - Localização dos pontos amostrais e barramento da PCH I



Fonte: Autoria Própria

4.4.1.2. Estações de amostragem no reservatório da PCH II

Conforme mencionado, o empreendimento conta com quatro pontos de amostragem, os quais são utilizados para a realização das campanhas de monitoramento de qualidade da água. Na Tabela 18 estão descritos os pontos, sua localização e características gerais do ambiente em que se encontra.

Tabela 18 - Pontos de Amostragem PCH II

Ponto	Localização	Coordenadas (UTM)	Característica do Ambiente
P1	Início do Reservatório	467370.18 m E 6927388.61 m S	Ambiente de transição (lótico/lêntico) com área de vegetação marginal preservada.

P2	Jusante do Canal de Fuga	467088.25 m E 6927916.24 m S	Área que recebe a água turbinada, trecho lótico com vegetação marginal parcialmente preservada.
P3	Jusante do Barramento	467052.53 m E 6928141.33 m S	Área de vazão reduzida, trecho de ambiente lótico, sobre influência da vazão vertida da PCH, com vegetação marginal preservada.
P4	Montante do Barramento	469237.67 m E 6930046.34 m S	Corpo do reservatório, ambiente lêntico, com vegetação marginal preservada.

Fonte: ABG (2020)

Na Figura 10 estão ilustradas as localizações dos pontos de amostragem mencionados pela Tabela 18. O correto entendimento das respectivas localidades se faz de grande importância no momento de análise de dados, visto que estas informações serão utilizadas para elaboração de hipóteses quando às possíveis variações encontradas na qualidade da água.

Figura 10 - Localização dos pontos amostrais e barramento da PCH II



Fonte: Autoria Própria

4.4.2. Análise e processamento dos dados

Tendo como informação de entrada os dados brutos coletados pelas campanhas de monitoramento da qualidade da água, se faz imperativa a utilização de métodos estatísticos para o processamento e eventuais correções desta base de dados, de forma a garantir coesão e confiabilidade às vindouras interpretações e correlações entre os parâmetros físicos, químicos e biológicos selecionados.

As informações foram inicialmente inseridas no software Microsoft Excel, de forma a organizar, filtrar e classificar as informações a serem utilizadas no presente estudo. Com o auxílio do software STATISTICA versão 10.0, foram realizadas as devidas estratégias de processamento de dados, juntamente com a construção dos gráficos apresentados.

4.4.2.1. Análise de dados

Primeiramente, os dados brutos foram inseridos no software Microsoft Excel, de forma a serem organizados de acordo com o respectivo empreendimento e ponto amostral, possibilitando a sua análise comparativa. Em seguida, com o auxílio da ferramenta “Formatação Condicional” foram aplicados filtros para identificação dos valores registrados que fugissem aos limites impostos pela legislação brasileira para a classe do corpo d’água estudado. Então, foram calculados os valores máximos, médios (ou mediana, caso o parâmetro não seguisse uma distribuição normal) e mínimos, para cada data de coleta e ponto amostral. Enfim, foram calculadas as porcentagens de enquadramento dos registros de coleta para cada ponto amostral estudado dentre as classes de corpos hídricos previstas. Para realização dos testes de normalidade foram utilizadas duas metodologias diferentes, cada uma aplicada de acordo com o número de unidades do grupo amostral. Para grupos com menos de 50 unidades, foi utilizado o teste de Shapiro-Wilk, enquanto para grupos com mais de 50 unidades, foi utilizado então o teste de Kruskal-Wallis. A classificação é realizada de acordo com o valor de “p” obtido, sendo considerados dados normais apenas caso o grupo obtenha valor de $p > 0,05$. Esta etapa foi realizada com o auxílio das ferramentas “Normality” e “Histograms”, presentes no software STATISTICA, versão 10.0.

Em seguida, de forma a possibilitar a observação de diferenças significativas entre cada parâmetro e as modificações ocorridas em razão do acúmulo, ou não, dos impactos ambientais decorrentes do barramento da água, foram aplicados os seguintes testes estatísticos: Teste T Pareado e Teste de Wilcoxon. Para tanto, foram comparados os pontos amostrais que se encontram em pontos similares nas respectivas PCHs. Para os grupos que obtiveram $p > 0,05$ e, portanto, apresentam distribuição normal dentre os dados, foi aplicado o Teste T Pareado, esta etapa foi realizada com o auxílio da ferramenta “T-test dependent samples” presente no software STATISTICA, versão 10.0. Para os grupos que não apresentam distribuição normal dentre os dados, foi necessária a utilização de testes não paramétricos, de modo a levar em consideração a dispersão dos resultados obtidos em torno dos valores médios das amostras, portanto, aplicou-se o teste de Wilcoxon. Esta etapa foi

realizada com o auxílio da ferramenta “Comparing two dependent samples” presente no software STATISTICA, versão 10.0.

Por fim, para a realização da análise de eficiência dos Índices de Qualidade Ambiental, foram realizadas comparações entre os valores apresentados para os parâmetros e índices estudados ao longo do período de monitoramento, de forma a verificar se os resultados apresentados refletem de forma satisfatória o estado de conservação do ponto estudado. Em sequência submeteu-se o histórico de dados utilizados para este estudo, agrupados de acordo com o seu ponto amostral, ao Teste de Correlação Spearman, o qual indica o nível de correlação, caso existente, entre variáveis diversas e possibilita a elaboração de suposições referentes ao comportamento do ecossistema. Como resultado deste teste, são apresentados os valores de “r” para cada dupla de variáveis, sendo este o indicador do grau de correlação dos dados. Esta etapa foi realizada com o auxílio das ferramentas “Correlations (Spearman, Kendall tau, gamma)” e “Spearman rank R”, presente no software STATISTICA, versão 10.0.

4.4.2.2. *Elaboração de elementos gráficos*

De forma a facilitar a visualização e o consequente entendimento das análises e correlações realizadas neste estudo, foram elaborados mapas, figuras, tabelas e gráficos por meio de diversos softwares.

As tabelas foram elaboradas com o auxílio da ferramenta MICROSOFT EXCEL, permitindo a sumarização dos resultados obtidos por campanha. Com a utilização da ferramenta “Formatação condicional” foi possível também realizar a classificação dos valores registrado de acordo com as normas vigentes para a CONAMA 357 no quesito de classificação do corpo d’água para usos múltiplos e para as diversas classes existentes para os Índices de Qualidade Ambiental.

Os gráficos box plot por sua vez, foram elaborados utilizando as informações importadas da planilha previamente citada e tratados com o auxílio da ferramenta “2D Graphs” e “Box Plots”, presentes no software STATISTICA 10.0.

As imagens via satélite foram editadas e importadas por meio do software GOOGLE EARTH. Os mapas de localização foram elaborados com o auxílio do software QGIS, fazendo uso das bases de dados oriundas de diversas fontes como: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (mapas municipais e estaduais), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (mapas de elevação) e Agência Nacional das Águas (mapas dos rios e bacias hidrográficas).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. AVALIAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DA QUALIDADE DA ÁGUA

Neste capítulo serão feitas avaliações com o intuito de verificar, por meio dos valores obtidos para cada parâmetro analisado, possíveis alterações das características físicas, químicas e microbiológicas do corpo hídrico durante a permanência e passagem pelos reservatórios artificiais. Os resultados obtidos foram comparados com os limites estabelecidos pela Resolução CONAMA N° 357/05 (Brasil, 2005) de modo a classificar o corpo d'água quanto ao seu enquadramento na referida resolução.

A análise dos dados quanto à sua normalidade indicou que grande parte dos resultados não atendem a uma distribuição normal, uma vez que existe significativa variação nos valores para cada ponto.

5.1.1. Variáveis Físicas, Químicas e Microbiológicas

5.1.1.1. *Clorofila-a*

A clorofila-a é um pigmento que existe, basicamente em cinco formas, denominadas clorofilas: "a"; "b"; "c"; "d"; "f" (LAKRUM e KÜHL, 2005; CHEN, et al., 2010). A clorofila é um dos vários pigmentos que ocorrem nos produtores primários aquáticos, sendo a designação de um grupo de pigmentos fotossintéticos presentes

nos cloroplastos das plantas (IAP, 2017). A clorofila-a é considerada a principal variável indicadora de estado trófico dos ambientes aquáticos (CETESB, 2006).

De forma complementar, este parâmetro é empregado como padrão de classificação para águas naturais, conforme a Resolução CONAMA 357/2005. Tal resolução estabelece que a concentração de clorofila-a em águas doces não pode ser superior a 10µg/L de clorofila-a para a Classe 1, 30µg/L para a Classe 2 e 60µg/L para a Classe 3.

Tabela 19 - Clorofila-a, PCH I

Clorofila a (µg/L)							
Data	P1	P2- Sup.	P4	P3	Mínimo	Máximo	Mediana
out/13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
inverno/13	0,00	1,30	1,00	1,20	0,00	1,30	1,10
primavera/13	0,00	1,00	1,20	0,00	0,00	1,20	0,50
verão/13	2,40	0,00	2,10	0,00	0,00	2,40	1,05
mai/14	2,50	2,50	2,80	2,60	2,50	2,80	2,55
nov/14	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
fev/15	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
mai/15	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
ago/15	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
nov/15	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
fev/16	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
abr/17	0,00	1,74	0,00	0,00	0,00	1,03	0,00
ago/17	0,00	0,00	0,00	1,03	0,00	0,00	0,00
out/17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,79	0,00
jan/18	2,79	0,00	0,00	0,00	0,00	2,42	0,00
abr/18	2,42	2,12	1,71	0,00	0,00	0,00	1,92
ago/18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,86	0,00
fev/19	1,51	1,53	0,00	1,86	0,00	0,00	1,52
ago/19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
fev/20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ago/20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mínimo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-
Máximo	2,79	2,50	2,80	2,60	-	2,80	-
Mediana	0,50	0,50	0,50	0,00	-	-	0,50
Classe 1	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%			
Classe 2	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%			
Classe 3	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%			

Classe 4	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
-----------------	------	------	------	------

Fonte: Autoria própria

Os valores de clorofila-a coletados para a PCH I, localizada a montante do layout de cascata, e apresentados na Tabela 19 estão todos enquadrados dentro de corpos d'água classe 1 e estão distantes do limite de 30µg/L previsto para o real enquadramento de Classe 2 do objeto deste estudo.

Os dados foram analisados no âmbito de sua normalidade conforme descrito na metodologia deste trabalho. Nenhum dos conjuntos de valores apresentou uma tendência de distribuição normal conforme o teste de normalidade, sendo todos $p > 0,05$. Os valores de p para cada ponto são: P1 = 0,00003; P2 = 0,00058; P4 = 0,00010; P3 = 0,00003. Visto que os dados possuem um comportamento não normal, foi então calculada a mediana para cada ponto, a qual não variou de forma significativa, permanecendo em 0,50µg/L (Classe 1) para a maioria dos pontos analisados.

Tabela 20 - Clorofila-a, PCH II

Clorofila a (µg/L)							
Data	P1	P4 - Sup.	P3	P2	Mínimo	Máximo	Mediana
set/11	3,00	5,00	3,00	3,00	3,00	5,00	3,00
out/11	-	-	-	-	-	-	-
jun/12	1,60	0,00	0,00	0,00	0,00	1,60	0,00
out/13	0,00	0,00	1,60	1,10	0,00	1,60	0,55
inverno/13	1,90	2,30	1,00	0,00	0,00	2,30	1,45
primavera/13	2,50	0,00	0,00	1,80	0,00	2,50	0,90
verão/13	1,90	2,80	1,90	1,20	1,20	2,80	1,90
mai/14	1,20	0,00	1,90	1,60	0,00	1,90	1,40
nov/14	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
fev/15	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
mai/15	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
ago/15	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
nov/15	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
fev/16	0,50	0,50	0,50	0,50	0,00	1,47	0,50
abr/17	0,00	1,47	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

out/17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	13,28	0,00
abr/18	1,16	0,00	13,28	0,00	0,00	0,00	0,58
out/18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
abr/19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
out/19	1,12	0,00	0,00	1,11	0,00	1,12	0,56
mai/20	0,00	1,68	0,00	3,24	0,00	3,24	0,84
out/20	2,48	2,86	3,09	0,00	0,00	3,09	2,67
Mínimo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-
Máximo	3,00	5,00	13,28	3,24	-	13,28	-
Mediana	0,50	0,50	0,50	0,50	-	-	0,50
Classe 1	100,0%	100,0%	95,2%	100,0%			
Classe 2	0,0%	0,0%	4,8%	0,0%			
Classe 3	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%			
Classe 4	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%			

Fonte: Autoria própria

Os valores de clorofila-a coletados para a PCH II, localizada a jusante do layout de cascata, e apresentados na Tabela 20 estão praticamente em sua totalidade enquadrados dentro de corpos d'água Classe 1, com exceção de um valor pontual obtido em abril/2018 para o ponto imediatamente a jusante do barramento, o qual foi enquadrado como sendo Classe 2. Porém, os valores estão ainda distantes do limite de 30µg/L previsto para o real enquadramento de Classe 2 do objeto deste estudo.

Os dados foram analisados no âmbito de sua normalidade conforme descrito na metodologia deste trabalho Nenhum dos conjuntos de valores apresentou um tendência de distribuição normal conforme o teste de normalidade, sendo todos $p < 0,05$. Os valores de p para cada ponto são: P1 = 0,00843; P4 = 0,00005; P3 = 0,0; P2 = 0,00032. Visto que os dados possuem um comportamento não normal, foi então calculada a mediana para cada ponto, a qual não variou de forma significativa, permanecendo em 0,50µg/L (Classe 1) para os três dos quatro pontos analisados.

5.1.1.2. Coliformes termotolerantes (NMP)

Os coliformes termotolerantes formam um grupo que compreende bactérias que podem estar nas fezes humanas ou de outros animais homeotérmicos, como também em águas ricas em nutrientes, solo e fitomassa em degradação (SPERLING,

1996). Devido a isto, são frequentemente utilizados como indicadores de poluição por esgotos domésticos. A avaliação da qualidade microbiológica da água pode ser realizada através da identificação de indicadores de contaminação fecal e indicadores biológicos, quando apropriado, utilizando-se organismos e/ou comunidades aquáticas (Amaral et al., 2003). Sua presença em grandes quantidades indica a possibilidade da existência de microrganismos patogênicos (*Escherichia coli*) que são responsáveis pela transmissão de doenças de veiculação hídrica (LAJO et al., 2012)

De forma complementar, este parâmetro é empregado como padrão de classificação para águas naturais, conforme a Resolução CONAMA 357/2005. Tal resolução estabelece que a concentração de Coliformes Termotolerantes em águas doces não pode ser superior a 200 NPM/100mL para a Classe 1, 1.000 NPM/100mL para a classe 2 e 2.500 NPM/100mL para a classe 3.

Tabela 21 - Coliformes Termotolerantes, PCH I

Coliformes Termotolerantes (NPM/100mL)							
Data	P1	P2- Sup.	P4	P3	Mínimo	Máximo	Mediana
out/13	20,00	84,00	98,00	74,00	20,00	98,00	79,00
inverno/13	243,00	131,00	292,00	203,00	131,00	292,00	223,00
primavera/13	313,00	10,00	51,00	41,00	10,00	313,00	46,00
verão/13	216,00	150,00	309,00	218,00	150,00	309,00	217,00
mai/14	350,00	160,00	211,00	199,00	160,00	350,00	205,00
nov/14	1,80	1,80	20,00	20,00	1,80	20,00	10,90
fev/15	2400,00	130,00	230,00	45,00	45,00	2400,00	180,00
mai/15	78,00	78,00	230,00	75,00	75,00	230,00	78,00
ago/15	20,00	20,00	1,80	1,80	1,80	20,00	10,90
nov/15	490,00	490,00	490,00	490,00	490,00	490,00	490,00
fev/16	20,00	78,00	20,00	38,00	20,00	78,00	29,00
abr/17	186,90	122,30	52,10	135,00	201,10	413,50	128,65
ago/17	396,60	201,10	284,70	413,50	20,20	96,00	340,65
out/17	52,10	20,20	96,00	86,00	10,00	63,20	69,05
jan/18	63,20	20,10	20,20	10,00	74,00	146,00	20,15
abr/18	109,00	74,00	146,00	121,00	52,00	272,00	115,00
ago/18	52,00	272,00	228,00	203,00	10,00	63,00	215,50
fev/19	63,00	10,00	41,00	20,00	1,00	20,00	30,50
ago/19	20,00	1,00	10,00	10,00	1,00	20,00	10,00
fev/20	97,00	2613,00	620,00	279,00	97,00	2613,00	449,50
ago/20	20,00	20,00	20,00	30,00	20,00	30,00	20,00

Mínimo	1,80	1,00	1,80	1,80	1,00	-	-
Máximo	2400,00	2613,00	620,00	490,00	-	2613,00	-
Mediana	78,00	78,00	98,00	75,00	-	-	78,00
Classe 1	66,7%	81,0%	57,1%	71,4%			
Classe 2	28,6%	14,3%	42,9%	28,6%			
Classe 3	4,8%	0,0%	0,0%	0,0%			
Classe 4	0,0%	4,8%	0,0%	0,0%			

Fonte: Autoria própria

Referente aos valores de Coliformes Totais coletados para a PCH I, localizada a montante do layout de cascata, e apresentados na Tabela 21, houve predominância de valores enquadrados como classe 1 e 2, porém com dois eventos, em fevereiro de 2015 e fevereiro de 2020, onde os pontos 1 e 4 foram enquadrados como classe 3 e 4, respectivamente. De forma geral, os pontos amostrais mantiveram uma mediana constante, com o ponto a jusante do barramento (local de vazão reduzida) com um valor superior de 98 NPM/100mL.

Os dados foram analisados no âmbito de sua normalidade conforme descrito na metodologia deste trabalho. Nenhum dos conjuntos de valores passou no teste de normalidade, sendo todos $p < 0,05$. Os valores de p para cada ponto são: P1 = 0,0; P2 = 0,0; P4 = 0,00413; P3 = 0,00205.

Tabela 22 - Coliformes Termotolerantes, PCH II

Data	Coliformes Termotolerantes (NPM/100mL)				Mínimo	Máximo	Mediana
	P1	P4 - Sup.	P3	P2			
set/11	1102,00	929,00	845,00	695,00	695,00	1102,00	887,00
out/11	365,00	410,00	461,00	613,00	365,00	613,00	435,50
jun/12	1986,00	1414,00	1733,00	1986,00	1414,00	1986,00	1859,50
out/13	52,00	75,00	30,00	52,00	30,00	75,00	52,00
inverno/13	189,00	1058,00	233,00	336,00	189,00	1058,00	284,50
primavera/13	63,00	10,00	41,00	20,00	10,00	63,00	30,50
verão/13	173,00	168,00	156,00	134,00	134,00	173,00	162,00
mai/14	185,00	121,00	189,00	160,00	121,00	189,00	172,50
nov/14	1,80	20,00	1,80	20,00	1,80	20,00	10,90
fev/15	230,00	330,00	270,00	110,00	110,00	330,00	250,00
mai/15	170,00	230,00	450,00	1,80	1,80	450,00	200,00
ago/15	45,00	1,80	1,80	1,80	45,00	490,00	1,80

nov/15	490,00	170,00	230,00	45,00	1,80	110,00	200,00
fev/16	40,00	45,00	110,00	1,80	30,40	74,50	42,50
abr/17	30,40	52,10	41,30	74,50	1,00	41,30	46,70
out/17	41,30	30,40	1,00	10,00	1,00	135,00	20,20
abr/18	110,00	86,00	1,00	135,00	20,00	63,00	98,00
out/18	31,00	31,00	20,00	63,00	121,00	537,00	31,00
abr/19	537,00	305,00	121,00	495,00	121,00	537,00	400,00
out/19	663,00	602,00	368,00	250,00	250,00	663,00	485,00
mai/20	88,40	14,00	92,00	98,50	14,00	98,50	90,20
out/20	41,00	86,00	10,00	30,00	10,00	-	-
Mínimo	1,80	1,80	1,00	1,80	1,00	-	-
Máximo	1986,00	1414,00	1733,00	1986,00	-	1986,00	-
Mediana	140,00	103,50	115,50	86,50	-	-	109,50
Classe 1	68,2%	63,6%	63,6%	72,7%			
Classe 2	22,7%	27,3%	31,8%	22,7%			
Classe 3	9,1%	9,1%	4,5%	4,5%			
Classe 4	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%			

Fonte: Autoria própria

Referente aos valores de Coliformes Totais coletados para a PCH II, localizada a jusante do layout de cascata, e apresentados na Tabela 22, houve predominância de valores enquadrados como classe 1 e 2, porém com eventos, onde os pontos enquadrados como classe 3. De forma geral, os pontos amostrais mantiveram uma mediana constante, porém com valores superiores àqueles encontrados no empreendimento a montante.

Os dados foram analisados no âmbito de sua normalidade conforme descrito na metodologia deste trabalho. Nenhum dos conjuntos de valores passou no teste de normalidade, sendo todos $p < 0,05$. Os valores de p para cada ponto são: P1 = 0,0; P2 = 0,0004; P4 = 0,0; P3 = 0,0.

5.1.1.3. *DBO₅*

Indicador que determina indiretamente a concentração de matéria orgânica biodegradável através da demanda de oxigênio exercida por microrganismos através da respiração.

A ocorrência de altos valores de DBO geralmente causada pelo lançamento de matéria orgânica através de esgotos domésticos, provoca uma diminuição dos valores de oxigênio dissolvido na água, o que pode provocar mortandade de peixes e eliminação de outros organismos aquáticos (SAAD, 2007).

Um elevado valor da DBO produz sabores e odores desagradáveis na água, obstrui os filtros de areia utilizados nas estações de tratamento de água, sendo um parâmetro importante no controle da eficiência das estações, tanto de tratamentos biológicos aeróbios e anaeróbios, bem como físico-químicos (MACÊDO, 2009).

De forma complementar, este parâmetro é empregado como padrão de classificação para águas naturais, conforme a Resolução CONAMA 357/2005. Tal resolução estabelece que a concentração de DBO em águas doces não pode ser superior a 3mg/L para a Classe 1, 5mg/L para a Classe 2 e 10mg/L para a Classe 3.

Tabela 23 - Demanda Bioquímica de Oxigênio, PCH I

Data	Demanda Bioquímica de Oxigênio (mg/L)						Mínimo	Máximo	Mediana
	P1	P2 - Sup.	P2 - Meio	P2 - Fundo	P4	P3			
out/13	2,00	2,00	-	-	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
inverno/13	3,00	3,00	-	-	2,00	2,00	2,00	3,00	2,50
primavera/13	4,00	5,00	-	-	4,00	3,00	3,00	5,00	4,00
verão/13	3,00	2,00	-	-	3,00	3,00	2,00	3,00	3,00
mai/14	2,00	2,00	-	-	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
nov/14	5,00	6,00	4,00	5,00	3,00	6,00	3,00	6,00	5,00
fev/15	5,20	3,80	5,20	3,90	3,90	3,90	3,80	5,20	3,90
mai/15	4,80	3,80	7,20	4,80	6,40	3,00	3,00	7,20	4,80
ago/15	4,50	3,40	4,30	10,40	4,40	5,30	3,40	10,40	4,45
nov/15	8,50	10,70	10,70	17,00	7,00	7,40	7,00	17,00	9,60
fev/16	24,30	38,00	32,00	20,60	32,80	32,40	20,60	38,00	32,20
abr/17	5,00	4,00	5,00	4,00	5,00	5,00	3,00	4,00	5,00
ago/17	3,00	4,00	3,00	4,00	3,00	3,00	2,00	4,00	3,00
out/17	4,00	3,00	4,00	3,00	2,00	4,00	2,00	4,00	3,50
jan/18	2,00	2,00	2,00	3,00	4,00	2,00	2,00	2,00	2,00
abr/18	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	3,00	2,00
ago/18	2,00	2,00	2,00	3,00	2,00	2,00	2,00	3,00	2,00
fev/19	3,00	2,00	2,00	2,00	3,00	2,00	2,00	3,00	2,00
ago/19	3,00	2,00	2,00	2,00	3,00	3,00	2,00	3,00	2,50
fev/20	2,00	2,00	2,00	3,00	2,00	2,00	2,00	3,00	2,00
ago/20	2,00	3,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	3,00	2,00

Mínimo	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	-	-
Máximo	24,30	38,00	32,00	20,60	32,80	32,40	-	38,00	-
Mediana	3,00	3,00	3,50	3,45	3,00	3,00	-	-	3,00
Classe 1	57,1%	57,1%	50,0%	50,0%	61,9%	66,7%			
Classe 2	28,6%	28,6%	25,0%	31,3%	23,8%	14,3%			
Classe 3	9,5%	4,8%	12,5%	0,0%	9,5%	14,3%			
Classe 4	4,8%	9,5%	12,5%	18,8%	4,8%	4,8%			

Referente aos valores de DBO coletados para a PCH I, localizada a montante do layout de cascata, e apresentados na Tabela 23 podemos observar uma variação muito grande nas classificações para o corpo d'água, com predominância de resultados enquadrados como Classe 1, porém com participações relevantes de Classe 2, Classe 3 e Classe 4. O valor da mediana, por sua vez, permaneceu na maioria dos pontos analisados, no limite entre as classes 1 e 2.

Os dados foram analisados no âmbito de sua normalidade conforme descrito na metodologia deste trabalho. Nenhum dos conjuntos de valores passou no teste de normalidade, sendo todos $p < 0,05$. Os valores de p para cada ponto são: P1 = 0,0; P2 – Sup = 0,0; P2 – Meio = 0,0; P2 – Fundo = 0,00006; P4 = 0,0; P3 = 0,0.

Tabela 24 - Demanda Bioquímica de Oxigênio, PCH II

Data	Demanda Bioquímica de Oxigênio (mg/L)						Mínimo	Máximo	Mediana
	P1	P4 - Sup.	P4 - Meio	P4 - Fundo	P3	P2			
set/11	2,00	2,00	-	-	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
out/11	2,00	2,00	-	-	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
jun/12	6,00	6,00	-	-	4,00	4,00	4,00	6,00	5,00
out/13	3,00	2,00	-	-	3,00	3,00	2,00	3,00	3,00
inverno/13	2,00	2,00	-	-	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
primavera/13	5,00	5,00	-	-	4,00	6,00	4,00	6,00	5,00
verão/13	2,00	2,00	-	-	3,00	2,00	2,00	3,00	2,00
mai/14	2,00	2,00	-	-	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
nov/14	3,00	3,00	3,00	4,00	3,00	4,00	3,00	4,00	3,00
fev/15	5,17	3,79	3,83	5,22	5,17	3,79	3,79	5,22	4,50
mai/15	4,40	6,21	4,83	9,66	7,44	4,36	4,36	9,66	5,52
ago/15	6,78	6,45	3,56	4,34	7,44	4,36	3,40	8,50	5,41
nov/15	8,50	3,40	4,80	8,45	5,90	7,00	19,50	39,00	6,45
fev/16	32,00	30,00	39,00	35,60	19,50	22,00	3,00	23,00	31,00
abr/17	4,00	5,00	6,00	23,00	7,00	3,00	2,00	5,00	5,50
out/17	4,00	2,00	2,00	5,00	2,00	4,00	2,00	2,00	3,00

abr/18	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
out/18	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	3,00	2,00
abr/19	2,00	3,00	3,00	2,00	2,00	2,00	2,00	3,00	2,00
out/19	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
mai/20	3,00	3,00	-	-	3,00	2,00	2,00	3,00	3,00
out/20	2,00	2,00	-	-	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Mínimo	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	-	-
Máximo	32,00	30,00	39,00	35,60	19,50	22,00	-	39,00	-
Mediana	3,00	2,50	3,28	4,67	3,00	2,50	-	-	3,00
Classe 1	59,1%	63,6%	50,0%	33,3%	63,6%	59,1%			
Classe 2	18,2%	18,2%	33,3%	25,0%	9,1%	27,3%			
Classe 3	18,2%	13,6%	8,3%	25,0%	22,7%	9,1%			
Classe 4	4,5%	4,5%	8,3%	16,7%	4,5%	4,5%			

Fonte: Autoria própria

Os valores de DBO coletados para a PCH II, localizada a jusante do layout de cascata, e apresentados na

Tabela 24 podemos observar uma variação muito grande nas classificações para o corpo d'água, com predominância de resultados enquadrados como Classe 1, porém com participações relevantes de Classe 2, Classe 3 e Classe 4. Importante mencionar que, de maneira geral, houve uma piora nos valores de DBO quando comparamos com o empreendimento a montante da cascata, podendo indicar efeito cumulativo prejudicial ao equilíbrio do ecossistema.

Os dados foram analisados no âmbito de sua normalidade conforme descrito na metodologia deste trabalho. Nenhum dos conjuntos de valores passou no teste de normalidade, sendo todos $p < 0,05$. Os valores de p para cada ponto são: P1 = 0,0; P4 – Sup = 0,0; P4 – Meio = 0,0001; P4 – Fundo = 0,00058; P3 = 0,0; P2 = 0,0.

5.1.1.4. **Fósforo Total**

O fósforo total é uma variável limnológica de grande importância, visto que além de determinar o nível de fósforo em um ambiente, estabelece a possibilidade de verificação do nível de eutrofização do corpo d'água. Este parâmetro é indispensável para o cálculo de indicadores de qualidade das águas e para índices de estado trófico.

A drenagem pluvial de áreas agrícolas e urbanas também é uma fonte significativa de fósforo para os corpos d'água. Entre os efluentes industriais destacam-se os das indústrias de fertilizantes, alimentícias, laticínios, frigoríficos e abatedouros (ANA, 2012).

De forma complementar, este parâmetro é empregado como padrão de classificação para águas naturais, conforme a Resolução CONAMA 357/2005. Tal resolução estabelece limitações que diferem de acordo com a classificação do ambiente em questão (lêntico, intermediário e lótico).

Tabela 25 - Fósforo Total, PCH I

Data	Fósforo Total (mg/L)						Mínimo	Máximo	Mediana
	P1	P2 - Sup.	P2 - Meio	P2 - Fundo	P4	P3			
verão/13	0,030	0,080	0,090	0,070	0,080	0,040	0,03	0,09	0,08
mai/14	0,050	2,770	0,020	0,020	0,020	0,003	0,00	2,77	0,02
nov/14	0,118	0,123	0,110	0,122	0,118	0,113	0,11	0,12	0,12
fev/15	0,100	0,135	0,181	0,173	0,147	0,100	0,10	0,18	0,14
mai/15	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,01	0,01	0,01
ago/15	0,195	0,074	0,010	0,010	0,010	0,010	0,01	0,20	0,01
nov/15	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,01	0,01	0,01
fev/16	0,145	0,137	0,163	0,156	0,137	0,180	0,14	0,18	0,15
abr/17	0,020	0,030	0,030	0,030	0,020	0,030	0,02	0,03	0,03
ago/17	0,030	0,020	0,020	0,020	0,150	0,150	0,02	0,15	0,03
out/17	0,130	0,040	0,050	0,100	0,040	0,030	0,03	0,13	0,05
jan/18	0,060	0,020	0,020	0,020	0,040	0,020	0,02	0,06	0,02
abr/18	0,040	0,050	0,470	0,250	0,110	0,040	0,04	0,47	0,08
ago/18	0,070	0,050	0,150	0,140	0,110	0,070	0,05	0,15	0,09
fev/19	0,150	3,070	0,470	0,810	0,020	0,050	0,02	3,07	0,31
ago/19	0,060	0,060	0,030	0,260	0,030	0,020	0,02	0,26	0,05
fev/20	0,020	0,060	0,080	0,040	0,010	0,020	0,01	0,08	0,03
ago/20	0,050	0,060	0,030	0,040	0,040	0,040	0,03	0,06	0,04
Mínimo	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	-	-
Máximo	0,20	3,07	0,47	0,81	0,15	0,18	-	3,07	-
Mediana	0,06	0,06	0,04	0,06	0,04	0,04	-	-	0,05
Classe 1	72,2%	22,2%	33,3%	33,3%	66,7%	83,3%			

Classe 2	0,0%	22,2%	22,2%	16,7%	0,0%	0,0%
Classe 3	22,2%	22,2%	0,0%	5,6%	33,3%	11,1%
Classe 4	5,6%	33,3%	44,4%	44,4%	0,0%	5,6%

Fonte: Autoria própria

Referente aos valores de Fósforo Total coletados para a PCH I, localizada a montante do layout de cascata, e apresentados na Tabela 25, podemos observar predominância de resultados enquadrados como Classe 1, apenas para os pontos amostrais não localizados no reservatório. Para os resultados obtidos dentro do reservatório da PCH I observamos predominância de valores correspondentes à corpos d'água classe 4 para todos os pontos amostrais, demonstrando o impacto do barramento no acúmulo de nutrientes aportados neste ecossistema.

Os dados foram analisados no âmbito de sua normalidade conforme descrito na metodologia deste trabalho. Apenas um dos conjuntos de dados obteve $p > 0,05$ possuindo, portanto, distribuição normal. Os valores de p para cada ponto são: P1 = 0,05567; P2 – Sup = 0,0; P2 – Meio = 0,00005; P2 – Fundo = 0,00001; P4 = 0,00398; P3 = 0,00246.

Tabela 26 - Fósforo Total, PCH II

Data	Fósforo Total (mg/L)						Mínimo	Máximo	Mediana
	P1	P4 - Sup.	P4 - Meio	P4 - Fundo	P3	P2			
set/11	0,030	0,040	-	-	0,040	0,040	0,03	0,04	0,04
out/11	0,070	0,070	-	-	0,070	0,060	0,06	0,07	0,07
jun/12	0,060	0,050	0,060	0,070	0,060	0,040	0,04	0,07	0,06
out/13	0,010	0,030	0,020	0,080	0,020	0,030	0,01	0,08	0,03
inverno/13	0,030	0,040	0,030	0,040	0,080	0,030	0,03	0,08	0,04
primavera/13	0,010	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,01	0,02	0,02
verão/13	0,060	0,030	0,080	0,030	0,040	4,770	0,03	4,77	0,05
mai/14	0,020	0,040	0,020	0,040	0,180	0,180	0,02	0,18	0,04
nov/14	0,129	0,136	0,175	0,147	0,119	0,106	0,11	0,18	0,13
fev/15	0,131	0,148	0,160	0,136	0,118	0,143	0,12	0,16	0,14
mai/15	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,01	0,01	0,01
ago/15	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,01	0,01	0,01
nov/15	0,010	0,010	0,013	0,031	0,010	0,010	0,01	0,03	0,01
fev/16	0,143	0,143	0,208	0,168	0,143	0,128	0,13	0,21	0,14

abr/17	0,030	0,020	0,030	0,640	0,020	0,030	0,02	0,64	0,03
out/17	0,050	0,100	0,100	0,060	0,100	0,110	0,05	0,11	0,10
abr/18	0,050	0,050	0,590	0,230	0,100	0,130	0,05	0,59	0,12
out/18	0,020	0,020	0,040	0,110	0,030	0,020	0,02	0,11	0,03
abr/19	0,030	0,020	0,030	0,310	0,020	0,040	0,02	0,31	0,03
out/19	0,080	0,050	0,070	0,060	0,150	0,040	0,04	0,15	0,07
mai/20	0,010	0,010	-	-	0,010	0,010	0,01	0,01	0,01
out/20	0,060	0,050	-	-	0,130	0,060	0,05	0,13	0,06
Mínimo	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	-	-
Máximo	0,14	0,15	0,59	0,64	0,18	4,77	-	4,77	-
Mediana	0,03	0,04	0,04	0,07	0,05	0,04	-	-	0,04
Classe 1	86,4%	36,4%	33,3%	16,7%	72,7%	68,2%			
Classe 2	0,0%	40,9%	22,2%	22,2%	0,0%	0,0%			
Classe 3	13,6%	4,5%	11,1%	16,7%	22,7%	22,7%			
Classe 4	0,0%	18,2%	33,3%	44,4%	4,5%	9,1%			

Fonte: Autoria própria

Referente aos valores de Fósforo Total coletados para a PCH II, localizada a jusante do layout de cascata, e apresentados na Tabela 26, podemos observar predominância de resultados enquadrados como Classe 1 para os pontos amostrais localizados fora do reservatório. O ponto amostral referente à análise da água superficial do reservatório demonstrou predominância de valores para corpos d'água classe 2, porém com participação significativa de valores de classe 3 e 4. Para os demais resultados observamos predominância de valores correspondentes à corpos d'água classe 4.

Os dados foram analisados no âmbito de sua normalidade conforme descrito na metodologia deste trabalho. Nenhum conjunto de dados obteve $p > 0,05$ possuindo, portanto, distribuição normal. Os valores de p para cada ponto são: P1 = 0,00143; P4 – Sup = 0,00044; P4 – Meio = 0,00001; P4 – Fundo = 0,00007; P3 = 0,01657; P2 = 0,0.

5.1.1.5. Nitrato

As fontes de nitrogênio para os corpos d'água são variadas, sendo uma das principais o lançamento de esgotos domésticos e efluentes industriais. Em áreas

agrícolas, o escoamento da água das chuvas em solos que receberam fertilizantes também é uma fonte de nitrogênio, assim como a drenagem de águas pluviais em áreas urbanas (CETESB, 2012). Também pode ocorrer a fixação biológica do nitrogênio atmosférico pelas algas e bactérias. Além disso, outros processos, tais como a deposição atmosférica pelas águas das chuvas também causam aporte de nitrogênio aos corpos d'água (LAJO et al., 2012).

De forma complementar, este parâmetro é empregado como padrão de classificação para águas naturais, conforme a Resolução CONAMA 357/2005. Tal resolução estabelece que a concentração de Nitrato em águas doces não pode ser superior a 10mg/L para a Classe 1, 2 e 3.

Tabela 27 - Nitrato, PCH I

Data	Nitrato (mg/L)						Mínimo	Máximo	Mediana
	P1	P2 - Sup.	P2 - Meio	P2 - Fundo	P4	P3			
out/13	0,90	0,20	0,09	0,09	0,20	0,09	0,09	0,90	0,15
inverno/13	0,71	0,37	0,41	0,31	0,45	0,33	0,31	0,71	0,43
primavera/13	0,17	0,17	0,16	0,17	0,17	0,16	0,16	0,17	0,17
verão/13	0,00	0,09	0,09	0,09	0,39	0,00	0,00	0,39	0,11
mai/14	0,17	0,31	0,30	0,27	0,41	0,27	0,17	0,41	0,29
nov/14	1,10	0,95	0,20	0,71	0,85	1,17	0,20	1,17	0,83
fev/15	17,74	0,99	1,97	1,40	1,12	1,19	0,99	17,74	4,07
mai/15	1,09	0,90	0,86	0,94	1,63	0,85	0,85	1,63	1,05
ago/15	0,20	0,20	0,20	0,25	0,20	0,20	0,20	0,25	0,21
nov/15	0,54	0,47	0,37	0,45	0,46	0,38	0,37	0,54	0,45
fev/16	0,20	0,20	0,29	0,20	0,25	0,29	0,20	0,29	0,24
abr/17	0,31	0,26	0,27	0,30	0,24	0,29	0,24	0,31	0,28
ago/17	0,09	0,20	0,21	0,20	0,20	0,20	0,09	0,21	0,18
out/17	0,41	0,41	0,44	0,44	0,43	0,45	0,41	0,45	0,43
jan/18	0,00	0,09	0,27	0,76	0,09	0,09	0,00	0,76	0,22
abr/18	0,30	0,29	0,30	0,35	0,30	0,32	0,29	0,35	0,31
ago/18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09	0,09	0,00	0,09	0,03
fev/19	0,19	0,25	0,00	0,58	0,09	0,14	0,00	0,58	0,21
ago/19	0,17	0,16	0,15	0,22	0,15	0,17	0,15	0,22	0,17
fev/20	0,15	0,14	0,14	0,12	0,16	0,14	0,12	0,16	0,14
ago/20	0,37	0,37	0,37	0,39	0,36	0,46	0,36	0,46	0,39
Mínimo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09	0,00	0,00	-	-
Máximo	17,74	0,99	1,97	1,40	1,63	1,19	-	17,74	-

Mediana	0,20	0,25	0,27	0,30	0,25	0,27	-	-	0,26
Classe 1, 2 e 3	95,2%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%			
Classe 4	4,76%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%			

Fonte: Autoria própria

Os valores de nitrato coletados para a PCH I, localizada a montante do layout de cascata, e apresentados na Tabela 27 podemos observar que os resultados foram majoritariamente enquadrados como Classe 1, com exceção do valor obtido para o ponto a montante do reservatório coletado na campanha de fevereiro de 2015.

Os dados foram analisados no âmbito de sua normalidade conforme descrito na metodologia deste trabalho. Nenhum conjunto de dados obteve $p > 0,05$ possuindo, portanto, distribuição normal. Os valores de p para cada ponto são: P1 = 0,0; P2 – Sup = 0,00057; P2 – Meio = 0,0; P2 – Fundo = 0,00454; P4 = 0,00005; P3 = 0,00021.

Tabela 28 - Nitrato, PCH II

Data	Nitrato (mg/L)						Mínimo	Máximo	Mediana
	P1	P4 - Sup.	P4 - Meio	P4 - Fundo	P3	P2			
set/11	0,90	0,70	-	-	0,60	1,40	0,60	1,40	0,80
out/11	0,50	0,90	-	-	0,60	0,60	0,50	0,90	0,60
jun/12	-	-	-	-	-	-	-	-	-
out/13	0,16	0,15	0,16	0,16	0,15	0,15	0,15	0,16	0,16
inverno/13	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
primavera/13	0,16	0,15	0,15	0,16	0,20	0,17	0,15	0,20	0,16
verão/13	0,09	0,09	0,09	0,09	0,81	0,09	0,09	0,81	0,09
mai/14	0,11	0,30	0,30	0,30	1,04	0,16	0,11	1,04	0,30
nov/14	0,24	1,07	0,91	0,87	0,94	0,77	0,24	1,07	0,89
fev/15	1,08	1,21	1,58	1,30	0,20	1,21	0,20	1,58	1,21
mai/15	0,90	0,75	0,12	0,13	0,67	0,83	0,12	0,90	0,71
ago/15	0,20	0,20	0,27	0,20	0,30	0,20	0,28	0,91	0,20
nov/15	0,43	0,41	0,43	0,91	0,28	0,70	0,20	0,33	0,43
fev/16	0,24	0,20	0,24	0,20	0,33	0,23	0,23	0,29	0,24
abr/17	0,29	0,23	0,29	0,28	0,23	0,25	0,00	0,42	0,27
out/17	0,40	0,39	0,42	0,42	0,00	0,36	0,23	0,32	0,40
abr/18	0,31	0,30	0,32	0,32	0,23	0,30	0,00	0,00	0,31
out/18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,23	0,40	0,00
abr/19	0,27	0,29	0,28	0,40	0,23	0,29	0,23	0,40	0,29

out/19	0,36	0,50	0,51	0,54	0,52	0,53	0,36	0,54	0,52
mai/20	0,09	0,14	-	-	0,09	0,10	0,09	0,14	0,10
out/20	0,27	0,24	-	-	0,24	0,24	0,24	0,27	0,24
Mínimo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-
Máximo	1,08	1,21	1,58	1,30	1,04	1,40	-	1,58	-
Mediana	0,27	0,29	0,28	0,28	0,24	0,25	-	-	0,28
Classe 1, 2 e 3	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%			
Classe 4	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%			

Fonte: Autoria própria

Os valores de nitrato coletados para a PCH II, localizada a jusante do layout de cascata, e apresentados na Tabela 28, podemos verificar que os resultados foram em sua totalidade enquadrados como Classe 1, resultado superior ao analisado para o empreendimento a montante da cascata.

Os dados foram analisados no âmbito de sua normalidade conforme descrito na metodologia deste trabalho. Nenhum conjunto de dados obteve $p > 0,05$ possuindo, portanto, distribuição normal. Os valores de p para cada ponto são: P1 = 0,00155; P4 – Sup = 0,00541; P4 – Meio = 0,00023; P4 – Fundo = 0,00530; P3 = 0,02598; P2 = 0,00278.

5.1.1.6. Oxigênio Dissolvido

Por sua importância na dinâmica e caracterização de ecossistemas aquáticos, a quantidade de oxigênio dissolvido em águas naturais deve ser um indicador analisado com cuidado. A concentração desta substância é variável, uma vez que é influenciada por diversos outros fatores como temperatura, salinidade, turbulência da água e pressão atmosférica (Esteves, 1998). Uma das causas mais frequentes da diminuição da vida aquática é a queda (depleção) na concentração de oxigênio nos corpos d'água. O valor mínimo de oxigênio dissolvido para a preservação da vida aquática, estabelecido pela Resolução CONAMA 357/05 é de 5,0 mg L⁻¹, mas existe uma variação na tolerância de espécie para espécie (LAJO et al., 2012).

De forma complementar, este parâmetro é empregado como padrão de classificação para águas naturais, conforme a Resolução CONAMA 357/2005. Tal resolução estabelece que a concentração de Oxigênio Dissolvido em águas doces não pode ser inferior a 6mg/L para a Classe 1, 4mg/L para a Classe 2 e 2mg/L para a Classe 3.

Tabela 29 - Oxigênio Dissolvido, PCH I

Data	Oxigênio Dissolvido (mg/L)						Mínimo	Máximo	Mediana
	P1	P2 - Sup.	P2 - Meio	P2 - Fundo	P4	P3			
out/13	8,10	8,77	7,88	5,96	7,84	8,10	5,96	8,77	7,99
inverno/13	11,87	11,54	9,64	9,81	9,89	9,75	9,64	11,87	9,85
primavera/13	9,64	8,93	7,87	8,91	9,30	8,82	7,87	9,64	8,92
verão/13	9,76	9,02	7,19	6,50	9,40	8,84	6,50	9,76	8,93
mai/14	-	-	-	-	-	-	-	-	-
nov/14	10,10	8,70	9,00	8,80	9,30	9,80	8,70	10,10	9,15
fev/15	5,20	2,20	1,65	1,90	2,20	1,90	1,65	5,20	2,05
mai/15	5,90	5,90	8,70	8,30	6,40	6,20	5,90	8,70	6,30
ago/15	8,70	8,40	8,20	7,80	8,90	8,70	7,80	8,90	8,55
nov/15	8,60	8,90	7,70	7,30	8,40	8,20	7,30	8,90	8,30
fev/16	7,70	7,80	6,90	6,50	7,80	7,60	6,50	7,80	7,65
abr/17	7,00	6,70	6,70	6,70	7,00	6,70	6,70	7,00	6,70
ago/17	10,10	10,70	10,70	10,70	9,80	10,70	9,80	10,70	10,70
out/17	7,60	7,60	7,40	7,40	7,70	8,50	7,40	8,50	7,60
jan/18	6,50	6,40	6,30	6,30	5,00	6,40	5,00	6,50	6,35
abr/18	7,30	7,50	7,80	7,70	7,20	8,10	7,20	8,10	7,60
ago/18	7,80	7,90	7,90	7,70	7,60	8,10	7,60	8,10	7,85
fev/19	7,12	6,80	5,40	0,12	7,08	6,20	0,12	7,12	6,50
ago/19	7,30	5,40	5,10	4,30	7,00	6,40	4,30	7,30	5,90
fev/20	8,00	6,20	4,80	1,40	8,00	7,40	1,40	8,00	6,80
ago/20	8,40	8,60	7,30	7,00	8,80	8,70	7,00	8,80	8,50
Mínimo	5,20	2,20	1,65	0,12	2,20	1,90	0,12	-	-
Máximo	11,87	11,54	10,70	10,70	9,89	10,70	-	11,87	-
Mediana	7,90	7,85	7,55	7,15	7,82	8,10	-	-	7,84
Classe 1	90,0%	85,0%	80,0%	75,0%	90,0%	95,0%			
Classe 2	10,0%	10,0%	10,0%	5,0%	5,0%	0,0%			
Classe 3	0,0%	0,0%	5,0%	5,0%	0,0%	0,0%			
Classe 4	0,0%	5,0%	0,0%	0,0%	5,0%	0,0%			
Indeterminado	0,0%	0,0%	4,8%	14,3%	0,0%	4,8%			

Fonte: Autoria própria

A partir dos valores de oxigênio dissolvido coletados para a PCH I, localizada a montante do layout de cascata, e apresentados na Tabela 29, podemos verificar que os resultados foram majoritariamente enquadrados como Classe 1, porém com alguns resultados relevantes de enquadramento em classes 3, 4 e indeterminado para os pontos amostrais localizados dentro do reservatório, com destaque para o exame amostral P2 – Fundo, o qual contou com 14,3% de amostras com valores abaixo da faixa de classificação.

Os dados foram analisados no âmbito de sua normalidade conforme descrito na metodologia deste trabalho. Apenas certos dados obtiveram $p > 0,05$ possuindo, portanto, distribuição normal. Os valores de p para cada ponto são: P1 = 0,84859; P2 – Sup = 0,28114; P2 – Meio = 0,13987; P2 – Fundo = 0,03265; P4 = 0,01076; P3 = 0,01591.

Tabela 30 - Oxigênio Dissolvido, PCH II

Data	Oxigênio Dissolvido (mg/L)						Mínimo	Máximo	Média
	P1	P4 - Sup.	P4 - Meio	P4 - Fundo	P3	P2			
set/11	7,00	6,60	-	-	6,70	7,30	6,60	7,30	6,90
out/11	6,70	5,90	-	-	6,50	6,70	5,90	6,70	6,45
jun/12	5,81	6,12	6,38	4,68	10,05	5,34	4,68	10,05	6,40
out/13	8,63	8,87	7,68	8,46	9,03	8,80	7,68	9,03	8,58
inverno/13	8,96	9,35	8,01	8,20	9,71	9,05	8,01	9,71	8,88
primavera/13	9,15	8,17	7,88	7,45	7,48	8,92	7,45	9,15	8,18
verão/13	8,35	8,74	7,26	7,58	7,01	8,74	7,01	8,74	7,95
mai/14	-	-	-	-	-	-	-	-	-
nov/14	8,10	8,30	8,30	8,50	10,10	8,90	8,10	10,10	8,70
fev/15	5,90	6,70	6,40	6,60	6,80	6,80	5,90	6,80	6,53
mai/15	9,80	9,70	9,50	8,90	10,20	10,10	8,90	10,20	9,70
ago/15	8,70	7,20	7,60	7,40	9,00	7,00	7,00	9,00	7,82
nov/15	7,80	8,30	6,70	6,10	7,30	7,10	6,10	8,30	7,22
fev/16	8,00	7,80	6,60	6,20	8,30	7,30	6,20	8,30	7,37
abr/17	7,00	6,60	6,40	5,80	6,70	6,70	5,80	7,00	6,53
out/17	8,60	6,80	7,60	7,50	7,60	6,80	6,80	8,60	7,48
abr/18	8,10	7,60	7,60	7,50	7,40	8,00	7,40	8,10	7,70
out/18	7,90	7,60	7,60	7,50	7,80	6,60	6,60	7,90	7,50
abr/19	6,98	6,56	6,49	4,90	6,90	6,37	4,90	6,98	6,37
out/19	7,80	7,20	6,40	5,80	7,30	8,10	5,80	8,10	7,10
mai/20	6,80	6,30	-	-	6,20	6,20	6,20	6,80	6,38
out/20	4,3	4,2	-	-	6,8	6,6	4,20	6,80	5,48

Mínimo	4,30	4,20	6,38	4,68	6,20	5,34	4,20	-	-
Máximo	9,80	9,70	9,50	8,90	10,20	10,10	-	10,20	-
Média	7,64	7,36	7,32	7,00	7,85	7,50	-	-	7,44
Classe 1	85,7%	90,5%	100,0%	76,5%	100,0%	95,2%			
Classe 2	9,5%	4,8%	0,0%	11,8%	0,0%	4,8%			
Classe 3	4,8%	4,8%	0,0%	11,8%	0,0%	0,0%			
Classe 4	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%			
Indeterminado	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%			

Fonte: Autoria própria

Os valores de Oxigênio Dissolvido coletados para a PCH II, localizada a jusante do layout de cascata, e apresentados na Tabela 30, podemos observar predominância de resultados enquadrados como Classe 1 para os todos pontos amostrais localizados. O ponto amostral referente à análise da água do fundo reservatório demonstrou uma maior presença de valores para corpos d'água classe 2 e 3, porém com participação não muito significativa.

Os dados foram analisados no âmbito de sua normalidade conforme descrito na metodologia deste trabalho. Apenas certos dados obtiveram $p > 0,05$ possuindo, portanto, distribuição normal. Os valores de p para cada ponto são: P1 = 0,39727; P4 – Sup = 0,81977; P4 – Meio = 0,3180; P4 – Fundo = 0,33000; P3 = 0,01068; P2 = 0,19284.

5.1.1.7. pH

Alterações nos valores de pH também podem aumentar o efeito de substâncias químicas, via solubilização, que são tóxicas para organismos aquáticos, tais como metais pesados (BRASIL, 2013; LAJO et al., 2012). No meio natural, o pH está associado à dissolução de rochas, à absorção de gases da atmosfera, à oxidação da matéria orgânica e à fotossíntese. Pode também estar associado a efluentes domésticos e industriais (SPERLING, 1996).

De forma complementar, este parâmetro é empregado como padrão de classificação para águas naturais, conforme a Resolução CONAMA 357/2005. Tal

resolução estabelece que o valor de pH em águas doces deve estar entre 6 e 9 para as Classes 1, 2, 3 e 4.

Tabela 31 - pH, PCH I

Data	pH						Mínimo	Máximo	Mediana
	P1	P2 - Sup.	P2 - Meio	P2 - Fundo	P4	P3			
out/13	8,35	8,16	7,95	8,13	8,30	8,31	7,95	8,35	8,23
inverno/13	8,13	8,06	7,94	6,70	7,72	7,96	6,70	8,13	7,95
primavera/13	8,60	8,40	7,99	8,31	8,19	8,15	7,99	8,60	8,25
verão/13	7,52	7,76	7,89	7,87	7,49	6,14	6,14	7,89	7,64
mai/14	-	-	-	-	-	-	-	-	-
nov/14	7,19	6,70	7,09	7,34	7,27	6,87	6,70	7,34	7,14
fev/15	7,15	7,27	7,89	7,35	7,48	7,47	7,15	7,89	7,41
mai/15	7,09	7,05	7,09	7,04	7,16	7,03	-	-	7,07
ago/15	7,18	7,11	7,22	7,27	7,04	7,29	7,04	7,29	7,20
nov/15	6,93	7,06	7,18	7,33	7,07	7,11	6,93	7,33	7,09
fev/16	7,29	7,26	7,17	7,14	6,84	7,23	6,84	7,29	7,20
abr/17	7,90	7,90	7,90	7,90	7,90	7,80	6,80	7,10	7,90
ago/17	7,10	6,90	6,90	6,80	7,10	6,80	6,80	7,00	6,90
out/17	6,90	7,00	7,00	7,00	6,80	6,80	5,00	7,10	6,95
jan/18	7,00	5,00	6,30	6,30	7,10	6,40	7,60	7,70	6,35
abr/18	7,70	7,69	7,69	7,62	7,70	7,60	6,90	7,25	7,69
ago/18	7,15	7,25	6,90	7,20	7,20	7,10	7,13	7,90	7,18
fev/19	7,13	7,27	7,50	7,20	7,36	7,90	7,70	8,48	7,32
ago/19	8,27	8,11	7,80	7,70	8,48	8,08	7,70	8,48	8,10
fev/20	6,98	6,00	6,07	6,11	6,40	7,74	6,00	7,74	6,26
ago/20	7,09	7,05	6,37	6,62	6,68	7,80	6,37	7,80	6,87
Mínimo	6,90	5,00	6,07	6,11	6,40	6,14	5,00	-	-

Máximo	8,60	8,40	7,99	8,31	8,48	8,31	-	8,60	-
Mediana	7,17	7,26	7,20	7,24	7,24	7,38	-	-	7,24
Classe 1, 2, 3 e 4	100,0%	90,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%			
Excede C4	0,0%	10,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%			

Fonte: Autoria própria

Por meio dos valores de pH coletados para a PCH I, localizada a montante do layout de cascata, e apresentados na Tabela 31, podemos verificar que os resultados foram majoritariamente enquadrados como Classe 1, 2, 3 e 4, com apenas uma amostra excedendo o limite determinado, esta sendo referente ao ponto amostral de água superficial do reservatório, coletada em janeiro de 2018

Os dados foram analisados no âmbito de sua normalidade conforme descrito na metodologia deste trabalho. Apenas certos dados obtiveram $p > 0,05$ possuindo, portanto, distribuição normal. Os valores de p para cada ponto são: P1 = 0,00180; P2 – Sup = 0,04019; P2 – Meio = 0,04919; P2 – Fundo = 0,96715; P4 = 0,64268; P3 = 0,69247.

Tabela 32 - pH, PCH II

Data	pH						Mínimo	Máximo	Mediana
	P1	P4 - Sup.	P4 - Meio	P4 - Fundo	P3	P2			
set/11	7,58	7,63	-	-	7,65	7,58	7,58	7,65	7,61
out/11	6,90	7,70	-	-	7,55	7,35	6,90	7,70	7,45
jun/12	7,00	6,99	7,24	7,27	6,40	7,91	6,40	7,91	7,12
out/13	6,79	7,18	7,76	7,68	8,20	8,21	6,79	8,21	7,72
inverno/13	7,85	7,66	7,94	7,89	7,29	8,16	7,29	8,16	7,87
primavera/13	7,94	8,19	8,03	7,84	7,29	8,16	7,29	8,19	7,99
verão/13	8,18	7,57	8,09	8,30	6,65	6,15	6,15	8,30	7,83
mai/14	-	-	-	-	-	-	-	-	-

nov/14	6,10	6,88	7,13	7,09	6,63	6,75	6,10	7,13	6,82
fev/15	8,04	7,65	7,95	8,00	8,01	8,80	7,65	8,80	8,01
mai/15	6,93	7,08	7,05	7,06	6,98	7,11	6,93	7,11	7,06
ago/15	7,28	7,18	7,16	7,06	7,27	7,40	6,89	7,10	7,23
nov/15	6,89	7,10	7,06	7,04	7,01	6,89	6,84	7,29	7,03
fev/16	7,29	7,26	7,17	7,14	6,84	7,23	7,70	7,70	7,20
abr/17	7,70	7,70	7,70	7,70	7,70	7,70	6,80	7,10	7,70
out/17	6,80	6,80	6,80	6,80	6,90	7,10	7,52	7,61	6,80
abr/18	7,60	7,52	7,52	7,52	7,61	7,52	7,30	7,30	7,52
out/18	7,30	7,30	7,30	7,30	7,30	7,30	6,90	7,40	7,30
abr/19	7,40	7,30	7,10	6,90	7,00	7,30	6,90	7,40	7,20
out/19	6,71	6,65	6,73	6,86	6,71	6,72	6,65	6,86	6,72
mai/20	6,31	6,71	-	-	6,68	6,61	6,31	6,71	6,65
out/20	6,10	6,29	-	-	5,98	6,07	5,98	6,29	6,09
Mínimo	6,10	6,29	6,73	6,80	5,98	6,07	5,98	-	-
Máximo	8,18	8,19	8,09	8,30	8,20	8,80	-	8,80	-
Mediana	7,29	7,28	7,24	7,27	7,14	7,33	-	-	7,28
Classe 1, 2, 3 e 4	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	95,2%	100,0%			
Excede C4	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	4,8%	0,0%			

Fonte: Autoria própria

Por meio dos valores de pH para a PCH II, localizada a jusante do layout de cascata, e apresentados na Tabela 32, podemos observar predominância de resultados enquadrados como Classe 1, 2, 3 e 4 com apenas uma amostra excedendo o limite determinado, esta sendo referente ao ponto amostral de água proveniente do fundo do reservatório, coletada em outubro de 2020.

Os dados foram analisados no âmbito de sua normalidade conforme descrito na metodologia deste trabalho. Todos os dados obtiveram $p > 0,05$ possuindo, portanto, distribuição normal. Os valores de p para cada ponto são: P1 = 0,60111; P4

– Sup = 0,89758; P4 – Meio = 0,14372; P4 – Fundo = 0,20183; P3 = 0,97533; P2 = 0,95031. Para o ponto P4, localizado dentro do reservatório, foi realizada também uma análise do estado de normalidade de forma conjunta para os valores obtidos nas diversas profundidades. Este dado também possui valores em distribuição normal, sendo o valor de p igual a 0,31837.

5.1.1.8. Sólidos Suspensos

Esse material é constituído de pequenas partículas que se encontram suspensas na água, as quais têm uma fração mineral ou inorgânica e outra orgânica. Portanto, o material em suspensão refere-se tanto a partículas orgânicas presentes na água tais como organismos microscópicos e detritos, quanto às inorgânicas de fácil sedimentação como argila, sílica e silte (BAUMGARTEN; POZZA, 2001). Segundo o IAP (2017), altas concentrações de material em suspensão limitam a qualidade de uma água bruta, podendo também causar dano à fauna e flora aquática devido à redução de penetração de luz na água e favorecendo o desenvolvimento de bactérias e fungos.

Tabela 33 - Sólidos Suspensos, PCH I

Sólidos Suspensos (mg/L)							
Data	P1	P2- Sup.	P4	P3	Mínimo	Máximo	Mediana
out/13	10,00	13,00	10,00	10,00	10,00	13,00	10,00
inverno/13	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
primavera/13	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
verão/13	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
mai/14	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
nov/14	11,00	11,00	11,00	20,00	11,00	20,00	11,00
fev/15	50,00	32,00	11,00	11,00	11,00	50,00	21,50
mai/15	11,00	24,00	11,00	11,00	11,00	24,00	11,00
ago/15	11,00	11,00	11,00	11,00	11,00	11,00	11,00

nov/15	32,00	18,00	12,00	34,00	12,00	34,00	25,00
fev/16	22,00	18,00	26,00	16,00	16,00	26,00	20,00
abr/17	20,00	14,00	13,00	16,00	13,00	20,00	15,00
ago/17	62,00	45,00	10,00	10,00	10,00	62,00	27,50
out/17	10,00	0,00	10,00	10,00	0,00	10,00	10,00
jan/18	20,00	10,00	10,00	10,00	10,00	20,00	10,00
abr/18	14,00	26,00	10,00	24,00	10,00	26,00	19,00
ago/18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
fev/19	0,00	10,00	0,00	0,00	0,00	10,00	0,00
ago/19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
fev/20	10,00	21,00	0,00	21,00	0,00	21,00	15,50
ago/20	10,00	10,00	10,00	12,00	10,00	12,00	10,00
Mínimo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-
Máximo	62,00	45,00	26,00	34,00	-	62,00	-
Mediana	10,00	11,00	10,00	10,00	-	-	10,00

Fonte: Autoria própria

Por meio dos valores de sólidos suspensos coletados para a PCH I, localizada a montante do layout de cascata, e apresentados na Tabela 33, podemos observar uma variação significativa entre os pontos amostrais estudados, (62,00mg/L a 26mg/L) sendo o local com menor valor máximo localizado imediatamente a jusante do barramento. O fato de o ponto com menores valores de Sólidos Suspensos estar localizado após o barramento pode ser justificado por conta da sedimentação de particular no ambiente lântico.

Os dados foram analisados no âmbito de sua normalidade conforme descrito na metodologia deste trabalho. Nenhum dos conjuntos de dados obteve $p > 0,05$, possuindo, portanto, distribuição normal. Os valores de p para cada ponto são: P1 = 0,00010; P2 = 0,01359; P4 = 0,00008; P3 = 0,00939.

Tabela 34 - Sólidos Suspensos, PCH II

Sólidos Suspensos (mg/L)							
Data	P1	P4 - Sup.	P3	P2	Mínimo	Máximo	Mediana
set/11	2,00	2,00	2,00	7,00	2,00	7,00	2,00
out/11	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
jun/12	33,00	24,00	21,00	29,00	21,00	33,00	26,50
out/13	10,00	18,00	10,00	10,00	10,00	18,00	10,00
inverno/13	10,00	14,00	10,00	10,00	10,00	14,00	10,00
primavera/13	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
verão/13	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
mai/14	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
nov/14	12,00	11,00	11,00	11,00	11,00	12,00	11,00
fev/15	11,00	11,00	11,00	11,00	11,00	11,00	11,00
mai/15	11,00	11,00	11,00	11,00	11,00	11,00	11,00
ago/15	11,00	11,00	11,00	11,00	11,00	11,00	11,00
nov/15	30,00	12,00	22,00	11,00	11,00	30,00	17,00
fev/16	20,00	28,00	24,00	16,00	16,00	28,00	22,00
abr/17	17,00	13,00	16,00	14,00	13,00	17,00	15,00
out/17	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
abr/18	22,00	30,00	26,00	36,00	22,00	36,00	28,00
out/18	0,00	10,00	0,00	10,00	0,00	10,00	5,00
abr/19	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
out/19	17,00	10,00	12,00	13,00	10,00	17,00	12,50

mai/20	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
out/20	48,00	11,00	27,00	10,00	10,00	48,00	19,00
Mínimo	0,00	2,00	0,00	2,00	0,00	-	-
Máximo	33,00	30,00	26,00	36,00	-	36,00	-
Mediana	10,00	11,00	10,00	10,00	-	-	10,00

Fonte: Autoria própria

Por meio dos valores de sólidos suspensos para a PCH II, localizada a jusante do layout de cascata, e apresentados na Tabela 34, podemos verificar pequena amplitude entre os pontos amostrais, novamente com o ponto imediatamente a jusante obtendo o menor valor máximo histórico. Para o empreendimento a jusante foram observados valores reduzidos quanto ao teor de sólidos suspensos, tal fato pode ser resultante da sedimentação ocorrida no empreendimento a montante, a qual reduziu significativamente os valores para este parâmetro.

Os dados foram analisados no âmbito de sua normalidade conforme descrito na metodologia deste trabalho. Nenhum dos conjuntos de dados obteve $p > 0,05$ possuindo, portanto, distribuição normal. Os valores de p para cada ponto são: P1 = 0,00092; P4 = 0,00031; P3 = 0,00768; P2 = 0,0.

5.1.1.9. Temperatura da Água

Diversos processos físicos, químicos e biológicos no ambiente aquático são afetados pela temperatura, sendo que o aumento desta reduz a capacidade de solubilização do oxigênio na água, ao mesmo tempo em que aumenta a demanda de oxigênio pelos organismos aquáticos (FACENS, 2006). A temperatura de águas superficiais é uma função de diversos fatores, incluindo latitude, altitude, estação do ano, hora do dia, taxa de vazão e profundidade (CETESB, 2006).

Tabela 35 - Temperatura da água, PCH I

Data	Temperatura da água (°C)								
	P1	P2 - Sup.	P2 - Meio	P2 - Fundo	P4	P3	Mínimo	Máximo	Média
out/13	17,50	19,90	16,00	16,20	17,50	16,90	16,00	19,90	17,33
inverno/13	7,20	5,70	6,60	6,10	6,90	6,10	5,70	7,20	6,43
primavera/13	15,20	15,20	14,80	14,90	14,90	15,80	14,80	15,80	15,13
verão/13	17,00	17,90	15,50	14,70	14,70	17,10	14,70	17,90	16,15
mai/14	-	-	-	-	-	-	-	-	-
nov/14	20,20	21,20	19,20	18,40	21,00	20,90	18,40	21,20	20,15
fev/15	28,70	29,20	29,00	29,30	29,80	29,40	28,70	29,80	29,23
mai/15	13,90	12,60	12,20	11,10	10,10	12,30	10,10	13,90	12,03
ago/15	17,30	17,80	16,20	15,90	16,10	16,40	15,90	17,80	16,62
nov/15	20,30	20,30	20,10	19,80	20,50	20,60	19,80	20,60	20,27
fev/16	25,10	25,80	24,90	24,30	25,00	23,90	23,90	25,80	24,83
abr/17	20,30	20,50	20,50	20,10	20,30	21,30	20,10	21,30	20,50
ago/17	16,30	16,60	15,20	14,90	15,50	15,10	14,90	16,60	15,60
out/17	18,10	18,50	17,80	17,40	17,70	17,10	17,10	18,50	17,77
jan/18	23,50	23,10	22,70	22,10	23,10	23,40	22,10	23,50	22,98
abr/18	21,20	21,90	20,60	20,40	20,60	20,50	20,40	21,90	20,87
ago/18	12,80	12,60	12,10	11,80	12,50	11,50	11,50	12,80	12,22
fev/19	23,90	24,60	22,50	21,30	23,80	23,30	21,30	24,60	23,23
ago/19	16,40	16,90	15,60	15,20	16,10	15,40	15,20	16,90	15,93
fev/20	24,80	26,40	25,20	24,40	25,80	25,30	24,40	26,40	25,32
ago/20	13,90	13,90	11,80	13,60	14,20	13,10	11,80	14,20	13,42
Mínimo	7,20	5,70	6,60	6,10	6,90	6,10	5,70	-	-
Máximo	28,70	29,20	29,00	29,30	29,80	29,40	-	29,80	-
Média	18,93	19,30	18,25	17,81	18,52	18,54	-	-	18,56

Fonte: Autoria própria

Por meio dos valores de temperatura da água coletados para a PCH I, localizada a montante do layout de cascata, e apresentados na Tabela 35, podemos verificar uma baixa variação nos valores médios de temperatura entre os pontos amostrais, com o ponto localizado imediatamente a montante do barramento registrando a menor temperatura média em seu trecho mais fundo.

Os dados foram analisados no âmbito de sua normalidade conforme descrito na metodologia deste trabalho. Todos os dados obtiveram $p > 0,05$ possuindo, portanto, distribuição normal. Os valores de p para cada ponto são: P1 = 0,95583; P2 – Sup = 0,97224; P2 – Meio = 0,97173; P2 – Fundo = 0,98424; P4 = 0,99583; P3 = 0,973970. Para o ponto P2, localizado dentro do reservatório, foi realizada também uma análise do estado de normalidade de forma conjunta para os valores obtidos nas diversas profundidades. Este dado também possui valores em distribuição normal, sendo o valor de p igual a 0,76740.

Tabela 36 - Temperatura da água, PCH II

Data	Temperatura da água (°C)								
	P1	P4 - Sup.	P4 - Meio	P4 - Fundo	P3	P2	Mínimo	Máximo	Média
set/11	14,00	14,00	-	-	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00
out/11	-	-	-	-	-	-	-	-	-
jun/12	15,60	15,40	15,20	15,40	14,70	15,60	14,70	15,60	15,32
out/13	17,10	17,20	15,20	16,20	14,40	18,50	14,40	18,50	16,43
inverno/13	5,00	5,10	5,00	5,30	6,50	5,30	5,00	6,50	5,37
primavera/13	14,40	15,20	13,90	14,40	14,20	15,30	13,90	15,30	14,57
verão/13	16,20	18,60	19,00	18,40	23,90	15,20	15,20	23,90	18,55
mai/14	-	-	-	-	-	-	-	-	-
nov/14	21,10	21,20	19,90	18,90	21,80	22,10	18,90	22,10	20,83
fev/15	24,30	25,10	25,10	25,40	21,30	27,50	21,30	27,50	24,78
mai/15	12,90	13,40	12,10	11,90	13,80	13,60	11,90	13,80	12,95

ago/15	17,20	18,40	17,80	16,90	17,40	17,70	16,90	18,40	17,57
nov/15	20,80	20,40	19,70	18,90	21,90	20,20	18,90	21,90	20,32
fev/16	25,70	25,00	24,20	23,80	24,30	23,20	23,20	25,70	24,37
abr/17	17,30	17,50	17,30	17,00	17,70	17,50	17,00	17,70	17,38
out/17	17,30	18,40	17,90	17,80	19,60	17,70	17,30	19,60	18,12
abr/18	20,50	21,60	20,90	20,90	22,30	20,60	20,50	22,30	21,13
out/18	19,30	19,40	19,40	19,10	19,30	18,50	18,50	19,40	19,17
abr/19	20,70	21,30	21,00	20,70	22,00	21,00	20,70	22,00	21,12
out/19	17,80	19,70	18,50	18,20	18,90	18,20	17,80	19,70	18,55
mai/20	17,70	17,60	-	-	18,10	17,20	17,20	18,10	17,65
out/20	27,40	28,00	-	-	24,60	28,10	24,60	28,10	27,03
Mínimo	5,00	5,10	5,00	5,30	6,50	5,30	5,00	-	-
Máximo	27,40	28,00	25,10	25,40	24,60	28,10	-	28,10	-
Média	18,12	18,63	17,77	17,60	18,54	18,35	-	-	18,17

Fonte: Autoria própria

Por meio dos valores de temperatura coletados para a PCH II, localizada a jusante do layout de cascata, e apresentados na Tabela 36, podemos verificar que o ponto com menor temperatura média continua sendo aquele imediatamente a montante do barramento e no seu trecho mais fundo. Em comparação com o empreendimento a jusante, foi possível verificar uma pequena redução dos valores médios encontrados para os três primeiros pontos (montante do reservatório e imediatamente a montante do barramento nos pontos superficiais e trecho médio).

Os dados foram analisados no âmbito de sua normalidade conforme descrito na metodologia deste trabalho. Todos os dados obtiveram $p > 0,05$ possuindo, portanto, distribuição normal. Os valores de p para cada ponto são: P1 = 0,17191; P4 – Sup = 0,09360; P4 – Meio = 0,16479; P4 – Fundo = 0,17021; P3 = 0,13807; P2 = 0,22473. Para o ponto P2, localizado dentro do reservatório, foi realizada também uma análise do estado de normalidade de forma conjunta para os valores obtidos nas diversas profundidades. Este dado também possui valores em distribuição normal, sendo o valor de p igual a 0,76740.

5.1.1.10. Turbidez

A turbidez é o grau de interferência que a passagem de um feixe de luz sofre ao ultrapassar a água, devido partículas suspensas. As partículas suspensas podem ser de origem orgânica ou inorgânica, as quais variam desde coloidais até sólidos de certas dimensões (CETESB, 2009). Turbidez elevada reduz a fotossíntese de vegetação, enraizada, submersa e de algas, em decorrência da diminuição da disponibilidade de luz, levando a redução da produtividade de peixes, bem como afeta a eficiência do processo de desinfecção da água. A turbidez afeta também os usos: doméstico, industrial e recreativo de uma água (ANA, 2012).

De forma complementar, este parâmetro é empregado como padrão de classificação para águas naturais, conforme a Resolução CONAMA 357/2005. Tal resolução estabelece que o valor de Turbidez em águas doces não deve ser superior a 40NTU para Classe 1 e 100NTU para Classes 2 e 3.

Tabela 37 - Turbidez, PCH I

Data	Turbidez (NTU)				Mínimo	Máximo	Mediana
	P1	P2- Sup.	P4	P3			
out/13	19,09	19,35	2,18	21,44	2,18	21,44	19,22
inverno/13	19,70	22,70	21,10	20,50	19,70	22,70	20,80
primavera/13	17,70	19,30	15,70	18,00	15,70	19,30	17,85
verão/13	12,60	25,20	26,20	44,70	12,60	44,70	25,70
mai/14	10,80	10,30	10,60	9,90	9,90	10,80	10,45
nov/14	24,80	30,00	21,00	23,30	21,00	30,00	24,05
fev/15	34,47	39,83	44,09	42,59	34,47	44,09	41,21
mai/15	1,00	1,00	19,08	10,00	1,00	19,08	5,50

ago/15	26,53	26,23	25,55	27,32	25,55	27,32	26,38
nov/15	65,00	53,00	57,00	55,00	53,00	65,00	56,00
fev/16	25,42	24,90	29,17	25,21	24,90	29,17	25,32
abr/17	20,90	18,70	19,80	18,50	12,60	14,70	19,25
ago/17	14,70	13,00	12,60	13,00	15,90	16,90	13,00
out/17	15,90	16,90	16,30	16,00	8,00	12,00	16,15
jan/18	8,00	8,60	12,00	10,00	26,30	30,10	9,30
abr/18	27,00	26,30	30,10	27,00	23,60	28,20	27,00
ago/18	23,60	28,20	26,70	27,70	11,80	18,00	27,20
fev/19	18,00	11,80	12,90	14,10	5,80	7,00	13,50
ago/19	6,90	6,20	7,00	5,80	5,80	7,00	6,55
fev/20	3,10	5,50	6,20	2,90	2,90	6,20	4,30
ago/20	12,00	12,70	13,40	14,20	12,00	14,20	13,05
Mínimo	1,00	1,00	2,18	2,90	1,00	-	-
Máximo	65,00	53,00	57,00	55,00	-	65,00	-
Mediana	18,00	19,30	19,08	18,50	-	-	18,79
Classe 1	95,2%	95,2%	90,5%	85,7%			
Classe 2 e 3	4,8%	4,8%	9,5%	14,3%			
Classe 4	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%			

Fonte: Autoria própria

A partir dos valores de turbidez coletados para a PCH I, localizada a montante do layout de cascata, e apresentados na Tabela 37 podemos verificar uma baixa variação entre as medianas registradas para os pontos amostrais. O ponto a jusante

do conduto forçado foi o que registrou a maior quantidade de valores fora da classe 1, porém ainda distantes do limite definido pelo CONAMA.

Os dados foram analisados no âmbito de sua normalidade conforme descrito na metodologia deste trabalho. Apenas certos dados obtiveram $p > 0,05$ possuindo, portanto, distribuição normal. Os valores de p para cada ponto são: P1 = 0,00327; P2 = 0,24124; P4 = 0,04150; P3 = 0,05621.

Tabela 38 - Turbidez, PCH II

Data	Turbidez (NTU)				Mínimo	Máximo	Mediana
	P1	P4 - Sup.	P3	P2			
set/11	23,00	21,00	20,00	17,00	17,00	23,00	20,50
out/11	28,00	29,00	29,00	31,00	28,00	31,00	29,00
jun/12	61,20	41,60	46,40	43,00	41,60	61,20	44,70
out/13	21,44	20,80	17,75	19,93	17,75	21,44	20,37
inverno/13	21,60	23,90	22,00	22,50	21,60	23,90	22,25
primavera/13	17,70	16,80	10,80	12,90	10,80	17,70	14,85
verão/13	15,70	15,90	15,50	13,90	13,90	15,90	15,60
mai/14	12,00	11,50	12,60	11,50	11,50	12,60	11,75
nov/14	19,70	20,40	28,10	19,90	19,70	28,10	20,15
fev/15	39,55	41,61	35,39	46,00	35,39	46,00	40,58
mai/15	19,37	1,00	19,32	1,00	1,00	19,37	10,16
ago/15	27,70	25,52	26,67	27,65	35,23	47,67	27,16
nov/15	47,38	45,99	35,23	47,67	25,78	29,47	46,69
fev/16	29,47	27,44	25,78	28,36	17,50	18,20	27,90

abr/17	18,20	17,60	17,50	17,50	13,90	17,20	17,55
out/17	17,00	16,40	13,90	17,20	32,00	37,70	16,70
abr/18	33,10	33,90	32,00	37,70	10,40	13,40	33,50
out/18	12,90	10,40	13,40	12,60	6,50	10,00	12,75
abr/19	6,50	6,60	6,60	10,00	6,50	10,00	6,60
out/19	47,20	44,70	43,20	43,30	43,20	47,20	44,00
mai/20	3,30	3,60	3,00	2,90	2,90	3,60	3,15
out/20	54,60	23,30	44,00	17,30	17,30	54,60	33,65
Mínimo	3,30	1,00	3,00	1,00	1,00	-	-
Máximo	61,20	45,99	46,40	47,67	-	61,20	-
Mediana	21,52	20,90	21,00	18,70	-	-	20,95
Classe 1	81,8%	81,8%	86,4%	81,8%			
Classe 2 e 3	18,2%	18,2%	13,6%	18,2%			
Classe 4	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%			

Fonte: Autoria própria

A partir dos valores de turbidez para a PCH II, localizada a jusante do layout de cascata, e apresentados na Tabela 38 podemos observar predominância de resultados enquadrados como Classe 1. Porém, de forma contrária ao verificado para o empreendimento à montante, foi observado para todos os pontos um aumento nos valores absolutos de turbidez, havendo conseqüentemente, maior presença das classes 2 e 3 nos enquadramentos citados.

Os dados foram analisados no âmbito de sua normalidade conforme descrito na metodologia deste trabalho. Todos os dados obtiveram $p > 0,05$ possuindo, portanto, distribuição normal. Os valores de p para cada ponto são: P1 = 0,10060; P4 = 0,44427; P3 = 0,59805; P2 = 0,13311.

5.1.2. Índices ambientais

5.1.2.1. IQA COMITESINOS

Aplicando a metodologia de cálculo proposta pelo COMITESINOS (1990) e utilizando os dados de acompanhamento para os parâmetros Oxigênio Dissolvido, Coliformes Termotolerantes, pH, *Demanda Bioquímica* de Oxigênio, Fosfato Total, Nitrato, Turbidez e Sólidos Suspensos obtidos pelas campanhas de monitoramento de qualidade da água, realizadas entre os anos de 2013 e 2020, foi possível realizar a classificação do corpo d'água quanto ao seu Índice de Qualidade Ambiental (IQA).

Tabela 39 - Índice de Qualidade de Água, PCH I

Índice de Qualidade de Água							
Data	P1	P2- Sup.	P4	P3	Mínimo	Máximo	Mediana
nov/14	81	83	77	77	77	77	77
fev/15	58	52	53	52	52	52	52
mai/15	69	69	65	70	65	65	65
ago/15	74	78	82	85	74	74	74
nov/15	65	65	66	66	65	65	65
fev/16	60	49	52	50	49	49	49
abr/17	70	72	74	70	70	70	70
ago/17	71	72	70	68	68	68	68
out/17	73	79	75	74	73	73	73
jan/18	77	69	74	81	69	69	69
abr/18	74	75	71	74	71	71	71
ago/18	74	70	69	70	69	69	69
fev/19	74	61	79	79	61	61	61
ago/19	78	82	80	80	78	78	78
fev/20	79	61	71	74	61	61	61
ago/20	81	79	80	79	79	79	79
Mínimo	58	49	52	50	49	-	-
Máximo	81	83	82	85	-	85	-
Mediana	74	71	73	74	-	-	73
Muito Ruim	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%			
Ruim	0,0%	6,3%	0,0%	6,3%			

Regular	31,3%	43,8%	37,5%	37,5%
Bom	68,8%	50,0%	62,5%	56,3%
Excelente	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Fonte: Autoria própria

A partir dos valores de IQA calculados para a PCH I, localizada a montante do layout de cascata, e apresentados na Tabela 39 podemos verificar que o resultado classifica o corpo d'água como sendo de qualidade majoritariamente boa, porém com grande variação no ponto a montante do barramento (P2-Sup.), sendo este, aparentemente o ponto mais degradado por apresentar cerca de 50% das amostras com valores de IQA inferiores a 70 pontos (classe "Regular"), porcentagem alta quando comparamos com os pontos P1 (25%), P4 (18,7%) e P3 (31,2%).

Os dados foram analisados no âmbito de sua normalidade conforme descrito na metodologia deste trabalho. Apenas certos dados obtiveram $p > 0,05$ possuindo, portanto, distribuição normal. Os valores de p para cada ponto são: P1 = 0,00179; P2 = 0,05829; P4 = 0,00343; P3 = 0,00298.

Tabela 40 - Índice de Qualidade da Água, PCH II

Índice de Qualidade de Água							
Data	P1	P4 - Sup.	P3	P2	Mínimo	Máximo	Mediana
nov/14	80	77	80	76	76	76	76
fev/15	66	64	68	64	64	64	64
mai/15	72	77	71	88	71	71	71
ago/15	78	86	87	82	78	78	78
nov/15	68	71	72	74	68	68	68
fev/16	50	56	59	66	50	50	50
abr/17	76	73	77	74	73	73	73
out/17	76	76	87	77	76	76	76
abr/18	74	74	85	71	71	71	71
out/18	81	81	81	77	77	77	77
abr/19	71	73	77	70	70	70	70
out/19	65	65	65	69	65	65	65
mai/20	74	80	74	75	74	74	74
out/20	64	66	72	75	64	64	64
Mínimo	50	56	59	64	50	-	-

Máximo	81	86	87	88	-	88	-
Média	71	73	75	74	-	-	73
Muito Ruim	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%			
Ruim	7,1%	0,0%	0,0%	0,0%			
Regular	28,6%	28,6%	21,4%	28,6%			
Bom	64,3%	71,4%	78,6%	71,4%			
Excelente	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%			

Fonte: Autoria própria

A partir dos valores de IQA calculados para a PCH II, localizada a jusante do layout de cascata, e apresentados na Tabela 40, podemos verificar que assim como constatado para o primeiro barramento, a categoria com mais amostras enquadradas na sua faixa de intervalos é a “Boa” ($71 \leq \text{IQA} \leq 90$), caracterizando um ambiente aquático pouco degradado. Porém, alternativamente ao que foi constatado para a PCH I, o ponto a jusante do barramento não foi o mais impactado, visto que o ponto P1 (início do reservatório) apresentou em seu histórico, resultados inferiores, sendo ainda classificado em fevereiro de 2016 como possuindo qualidade da água ruim ($25 \leq \text{IQA} \leq 50$). De forma geral, observou-se uma pequena melhora nos valores de IQA calculados em comparação com o empreendimento a montante, com alteração no ponto mais degradado, passando do local imediatamente a montante do barramento (PCH I) para o ponto a montante do reservatório (PCH II).

Os dados foram analisados no âmbito de sua normalidade conforme descrito na metodologia deste trabalho. Apenas certos pontos amostrais obtiveram $p > 0,05$ possuindo, portanto, distribuição normal. Os valores de p para cada ponto são: P1 = 0,25081; P4 = 0,27275; P3 = 0,59245; P2 = 0,02264.

5.1.2.2. IET

Seguindo a metodologia de cálculo para o Índice de Estado Trófico proposta pela Agência Nacional das Águas (2015) e utilizando os valores de clorofila-*a* e fósforo total presentes no banco de dados dos programas de monitoramento da qualidade das águas entre os anos de 2013 e 2020, foram obtidas então as classificações do índice de trofia para os reservatórios artificiais estudados.

Tabela 41- Índice de Estado Tráfico, PCH I

Índice de Estado Tráfico							
Data	P1	P4 - Sup.	P3	P2	Mínimo	Máximo	Mediana
nov/14	52,6	57,7	52,4	52,1	52	58	53
fev/15	52,6	58,0	52,3	52,8	52	58	53
mai/15	45,9	49,8	45,9	45,9	46	50	46
ago/15	45,9	49,8	45,9	45,9	46	50	46
nov/15	45,9	49,8	45,9	45,9	53	58	46
fev/16	52,9	57,8	52,8	52,5	21	51	53
abr/17	20,6	50,6	20,5	20,6	21	31	21
out/17	20,7	31,2	20,9	20,9	21	41	21
abr/18	40,4	29,1	41,3	21,0	21	26	35
out/18	20,5	26,3	20,6	20,5	21	21	21
abr/19	20,9	21,0	20,5	20,7	21	21	21
out/19	40,6	29,1	21,0	40,4	21	41	35
mai/20	20,3	48,8	20,3	20,3	20	49	20
out/20	40,7	55,0	41,0	20,8	21	55	41
Mínimo	20	21	20	20	20	-	-
Máximo	53	58	53	53	-	58	-
Mediana	41	50	41	31	-	-	41
Ultraoligotráfico	78,6%	35,7%	78,6%	78,6%			
Oligotráfico	0,0%	35,7%	0,0%	0,0%			
Mesotráfico	21,4%	28,6%	21,4%	21,4%			
Eutrófico	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%			
Supereutrófico	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%			
Hipereutrófico	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%			

Fonte: Autoria própria

Para o empreendimento mais a montante (PCH I), chegou-se aos valores dispostos na Tabela 41, a qual ilustra o enquadramento referente ao valor obtido,

dentro das seis categorias definidas para o Índice de Estado Trófico. Este resultado enquadra o corpo d'água em estado majoritário de Ultraoligotrofia, ou seja, como corpo d'água limpo, de produtividade muito baixa e concentrações insignificantes de nutrientes que não acarretam prejuízo aos usos d'água.

Porém, foram também observadas variações pontuais no IET até a caracterização de Supereutrofia, sendo esta utilizada segundo a ANA (2015) para ambientes com alta produtividade em relação às condições naturais, de baixa transparência, em geral afetados por atividades antrópicas, nos quais ocorrem com frequência alterações indesejáveis na qualidade da água, como a ocorrência de episódios de florações de algas, e interferências nos seus usos múltiplos. Esta degradação de qualidade referente ao estado de trofia da água foi detectada no ponto mais a montante do barramento (P2-Sup.), sendo este o mais impactado pelo acúmulo de nutrientes e sedimentos decorrente da interrupção do fluxo d'água, com 6,3% das amostras enquadradas nesta classificação e 37,5% classificadas como Mesotróficas.

Os dados foram analisados no âmbito de sua normalidade conforme descrito na metodologia deste trabalho. Nenhum grupo de dados obteve $p > 0,05$ possuindo, portanto, distribuição normal. Os valores de p para cada ponto são: P1 = 0,00195; P2 = 0,00631; P4 = 0,00032; P3 = 0,00095.

Tabela 42 - Índice de Estado Trófico, PCH II

Índice de Estado Trófico							
Data	P1	P4 - Sup.	P3	P2	Mínimo	Máximo	Mediana
nov/14	52,6	57,7	52,4	52,1	52	58	53
fev/15	52,6	58,0	52,3	52,8	52	58	53
mai/15	45,9	49,8	45,9	45,9	46	50	46
ago/15	45,9	49,8	45,9	45,9	46	50	46
nov/15	45,9	49,8	45,9	45,9	53	58	46
fev/16	52,9	57,8	52,8	52,5	21	51	53
abr/17	20,6	50,6	20,5	20,6	21	31	21
out/17	20,7	31,2	20,9	20,9	21	41	21

abr/18	40,4	29,1	41,3	21,0	21	26	35
out/18	20,5	26,3	20,6	20,5	21	21	21
abr/19	20,9	21,0	20,5	20,7	21	21	21
out/19	40,6	29,1	21,0	40,4	21	41	35
mai/20	20,3	48,8	20,3	20,3	20	49	20
out/20	40,7	55,0	41,0	20,8	21	55	41
Mínimo	20	21	20	20	20	-	-
Máximo	53	58	53	53	-	58	-
Mediana	41	50	41	31	-	-	41
Ultraoligotrófico	78,6%	35,7%	78,6%	78,6%			
Oligotrófico	0,0%	35,7%	0,0%	0,0%			
Mesotrófico	21,4%	28,6%	21,4%	21,4%			
Eutrófico	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%			
Supereutrófico	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%			
Hipereutrófico	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%			

Fonte: Autoria própria

A partir dos valores de IET calculados para a PCH II, localizada a jusante do layout de cascata, e apresentados na Tabela 42, podemos verificar que, de forma similar ao mencionado anteriormente, classifica-se este corpo d'água como sendo majoritariamente Ultraoligotrófico, chegando porém à classificação de Mesotrofia, sendo esta utilizada para corpos d'água com produtividade intermediária, com possíveis implicações sobre a qualidade da água, porém em níveis aceitáveis na maioria dos casos. O ponto mais impactado, em semelhança ao empreendimento anterior, foi aquele imediatamente a montante do barramento (P4-Sup.), porém foi observada menor participação de ambientes com classificação de Mesotróficos ou superior, estes com contribuição de 28,6% (contra os 43,8% citados anteriormente para a PCH I).

Os dados foram analisados no âmbito de sua normalidade conforme descrito na metodologia deste trabalho. Nenhum grupo de dados obteve $p > 0,05$ possuindo,

portanto, distribuição normal. Os valores de p para cada ponto são: $P1 = 0,00639$; $P4 = 0,01602$; $P3 = 0,00310$; $P2 = 0,00144$.

5.1.2.3. IQAR

Seguindo a metodologia de cálculo para o Índice de Qualidade de Água de Reservatórios proposta pelo Instituto Ambiental do Paraná e utilizando os dados presentes no banco de dados dos programas de monitoramento da qualidade das águas entre os anos de 2013 e 2020, foram obtidas então as classificações do respectivo índice para os reservatórios artificiais estudados. Para esta etapa, foram calculados apenas os valores para os pontos amostrais localizados dentro dos reservatórios dos empreendimentos.

Tabela 43 - Índice de Qualidade da Água de Reservatórios, PCH I

Índice de Qualidade da Água de Reservatórios				
Data	P2	Mínimo	Máximo	Mediana
nov/14	2,76	2,76	2,76	2,76
fev/15	3,81	3,81	3,81	3,81
mai/15	2,78	2,78	2,78	2,78
ago/15	2,41	2,53	2,53	2,41
nov/15	2,53	2,89	2,89	2,53
fev/16	2,89	2,77	2,77	2,89
abr/17	2,77	1,94	1,94	2,77
ago/17	1,94	2,49	2,49	1,94
out/17	2,49	2,34	2,34	2,49
jan/18	2,34	3,06	3,06	2,34
abr/18	3,06	3,06	3,06	3,06
ago/18	2,77	2,77	2,77	2,77
fev/19	3,42	3,42	3,42	3,42
ago/19	2,93	2,93	2,93	2,93

fev/20	2,89	2,89	2,89	2,89
ago/20	2,77	2,77	2,77	2,77
Mínimo	1,94	1,94	-	-
Máximo	3,81	-	3,81	-
Mediana	2,78	-	-	2,78
Não impactado	0,0%			
Pouco degradado	25,0%			
Moderadamente degradado	68,8%			
Criticamente degradado	6,3%			
Muito poluído	0,0%			
Extremamente poluído	0,0%			

Fonte: Autoria própria

A partir dos valores de IQAR calculados para a PCH I, localizada a montante do layout de cascata, e apresentados na Tabela 43, podemos enquadrar o reservatório da PCH I como sendo “Moderadamente Degradado” em 68,8% das amostras coletadas, o que de acordo com o Instituto Ambiental do Paraná (2004) implica que este corpo d’água apresenta um déficit considerável de oxigênio dissolvido na coluna d’água, podendo ocorrer anoxia na camada de água próxima ao fundo em determinados períodos, conta com médio aporte de nutrientes e matéria orgânica, implicando em uma grande probabilidade da proliferação de algas e possui tendência moderada à eutrofização.

Importante salientar que na campanha de fevereiro de 2015 o reservatório foi classificado como sendo “Criticamente Degradado”, alcançando 3,81 pontos na classificação do IQAR. Segundo as classificações do referido índice, este valor atesta a capacidade de produção de uma depleção crítica nos teores de oxigênio dissolvido na coluna d’água, devido ao aporte considerável de cargas de nutrientes e alta tendência a eutrofização caracterizada pelo desenvolvimento ocasional e maciço de populações de algas ou cianobactérias. A partir desta classe é possível a ocorrência de mortandade de peixes em determinados períodos de acentuado déficit de oxigênio dissolvido (IAP, 2004).

Os dados foram analisados no âmbito de sua normalidade conforme descrito na metodologia deste trabalho. O grupo de valores para o reservatório do empreendimento atingiu valor menor que $p > 0,05$ não possuindo, portanto, distribuição normal. O valor de p para o ponto é: $P2 = 0,03407$;

Tabela 44 - Índice de Qualidade da Água de Reservatórios, PCH II

Índice de Qualidade da Água de Reservatórios				
Data	P4	Mínimo	Máximo	Média
nov/14	2,44	2,44	2,44	2,44
fev/15	2,53	2,53	2,53	2,53
mai/15	2,37	2,37	2,37	2,37
ago/15	2,17	2,41	2,41	2,41
nov/15	2,41	2,89	2,89	2,89
fev/16	2,89	2,68	2,68	2,68
abr/17	2,68	2,73	2,73	2,73
out/17	2,73	2,93	2,93	2,93
abr/18	2,93	2,41	2,41	2,41
out/18	2,41	2,52	2,52	2,52
abr/19	2,52	2,52	2,52	2,52
out/19	3,02	3,02	3,02	3,02
mai/20	2,95	2,95	2,95	2,95
out/20	2,95	2,95	2,95	2,95
Mínimo	2,17	2,17	-	-
Máximo	3,02	-	3,02	-
Média	2,64	-	-	2,64
Não impactado	0,0%			
Pouco degradado	35,7%			
Moderadamente degradado	64,3%			
Criticamente degradado	0,0%			
Muito poluído	0,0%			
Extremamente poluído	0,0%			

Fonte: Autoria própria

A partir dos valores de IQAR calculado para a PCH II, localizada a jusante do layout de cascata, e apresentados na Tabela 44, podemos atestar uma redução na pontuação do índice, indicando uma melhora no estado de conservação do ambiente aquático. Estes valores impediram que o reservatório alcance a classificação de “Criticamente Degradado a Poluído”, como o empreendimento anterior e aumentaram o percentual de enquadramento da classe Pouco Degradado, de 25% registrados no empreendimento a montante para 35,7% registrados na PCH II.

Os dados foram analisados no âmbito de sua normalidade conforme descrito na metodologia deste trabalho. O grupo de valores para o reservatório do empreendimento atingiu valor maior que $p > 0,05$ possuindo, portanto, distribuição normal. O valor de p para o ponto é: $P2 = 0,23090$;

5.2. APLICAÇÃO DOS ÍNDICES DE QUALIDADE AMBIENTAL

Neste capítulo será realizada a análise dos índices de qualidade ambiental estudados (Índice de Qualidade da Água, Índices de Estado Trófico e Índice de Qualidade da Água de Reservatórios) quanto à existência de complementaridade entre si e dissertar no que tange à confiabilidade da aplicação destas metodologias de forma isolada para determinação dos impactos sofridos pelo referido corpo d’água. Para tanto, serão utilizadas informações obtidas por meio da aplicação da Correlação de Spearman, calculada com o auxílio do software STATISTICA 10.0, entre os resultados obtidos dos índices para cada ponto de ambos os empreendimentos.

Para o primeiro empreendimento, foram observados valores medianos, constantes e inversamente proporcionais de correlação entre o IQA e IET para os pontos localizados no início do reservatório ($r = -0,662474$), a jusante do barramento ($r = -0,567601$) e a jusante do canal de fuga ($r = -0,660736$). Para o ponto localizado imediatamente a montante do barramento, não foi identificada correlação entre os valores de IQA e IET, porém neste ponto foi identificado valor mediano e diretamente proporcional de correlação entre o IQAR e IET ($r = 0,598665$). A partir desta análise,

podemos entender que para o empreendimento a montante, estão ocorrendo processos de eutrofização e degradação da qualidade da água de forma simultânea em quase todos os pontos amostrais, com ambos os valores de IQA e IET estatisticamente correlacionados. Por outro lado, isto não ocorre para o ponto localizado a montante do barramento, onde não há correlação com os valores de IQA, mas sim entre IET e IQAR. Portanto, com a alteração dos ambientes amostrais, são verificadas também variações no comportamento dos índices, necessitando de medições complementares para aferir as corretas interpretações do ambiente de estudo.

O teste de correlação de Spearman aplicado ao segundo empreendimento, diferentemente do anterior, demonstrou apenas valores medianos e inversamente proporcionais de correlação entre o IQA e IET para os pontos localizados no início do reservatório ($r=-0,730901$) e imediatamente a montante do barramento ($r=-0,657778$). Portanto, para este empreendimento não possuímos evidências que comprovem correlação entre índices (IQA, IET, IQAR) nos pontos a jusante do barramento e a jusante do conduto forçado, indicando que o processo de eutrofização e o estado de conservação da água, nos moldes dos cálculos previstos, ocorrem de maneira independente.

Ainda que se tratando de empreendimentos em cascata, situados no mesmo corpo hídrico e com uma localização bastante próxima, não observamos uma constância na correlação entre os índices ambientais para os pontos amostrais semelhantes. Tal fato acentua a necessidade de atenção na aplicação de tais metodologias, uma vez que os empreendimentos deste estudo de caso não apresentaram comportamentos similares, sendo necessária a análise de outros dados para o completo entendimento do estado de conservação do ambiente. Tal inconsistência pode também ser indício da ocorrência de alterações na interação entre os parâmetros, causadas pela operação de empreendimentos em cascata, tópico que será abordado no próximo item.

5.3. AVALIAÇÃO DOS EFEITOS CUMULATIVOS

Neste capítulo buscamos analisar a ocorrência de possíveis alterações decorrentes do efeito cumulativo sobre as características físicas, químicas e biológicas do corpo d'água, causadas pela operação dos empreendimentos geradores de energia hidrelétrica construídos em layout de cascata.

Primeiramente, é importante ressaltar que grande parte dos dados utilizados não apresentaram distribuição normal entre o seu grupo amostral, demonstrando grande variação dentro o histórico estudado. Para estes dados foram utilizados os resultados obtidos na etapa de Avaliação Espaço-Temporal da Qualidade da Água com tratamento dos dados brutos, realizado por meio de diversos testes estatísticos como: Teste de Normalidade, Teste-T Pareado e Teste de Wilcoxon. Posteriormente foi realizada a elaboração dos gráficos box-plot, utilizado o software STATISTICA 10.0 para conferência visual dos dados coletados por meio dos testes estatísticos.

5.3.1. Parâmetros para avaliação da qualidade da água

Para os valores de Clorofila-a, aos conjuntos de dados que não apresentaram tendência de distribuição normal conforme o teste de normalidade, foi então aplicado o teste de Wilcoxon para cada ponto correspondente entre os empreendimentos, de acordo com metodologia anteriormente citada. Obteve-se como resultado que não houve alterações significativas entre pontos amostrais dos dois empreendimentos ($p < 0,05$). Os resultados do Teste de Wilcoxon para cada ponto amostral foram os seguintes: Montante do reservatório (P1) não houve diferença significativa ($p = 0,48$); Barramento (P2/P4) não houve diferença significativa ($p = 0,58$); Jusante do Barramento (P4/P3) não houve diferença significativa ($p = 0,34$); Casa de Força (P3/P2) não houve diferença significativa ($p = 0,44$); Portanto, podemos afirmar que, para os valores obtidos para a Clorofila-a, não foram descobertas evidências que comprovem a existência de efeitos cumulativos causados pela operação dos empreendimentos em estudo.

Para os valores de Coliformes Termotolerantes, aos conjuntos de dados que não apresentaram tendência de distribuição normal conforme o teste de normalidade, foi então aplicado o teste de Wilcoxon para cada ponto correspondente entre um

empreendimento e outro, de acordo com metodologia anteriormente citada. Obteve-se como resultado que não houve alterações significativas entre pontos amostrais dos dois empreendimentos ($p < 0,05$). Os resultados do Teste de Wilcoxon para cada ponto amostral foram os seguintes: Montante do reservatório (P1) não houve diferença significativa ($p = 0,67$); Barramento (P2/P4) não houve diferença significativa ($p = 0,72$); Jusante do Barramento (P4/P3) não houve diferença significativa ($p = 0,21$); Casa de Força (P3/P2) não houve diferença significativa ($p = 0,32$). Portanto, podemos afirmar que, para os valores obtidos para os Coliformes Termotolerantes, não foram descobertas evidências que comprovem a existência de efeitos cumulativos causados pela operação dos empreendimentos em estudo.

Para os valores de DBO, aos conjuntos de dados que não apresentaram tendência de distribuição normal conforme o teste de normalidade, foi então aplicado o teste de Wilcoxon para cada ponto correspondente entre um empreendimento e outro, de acordo com metodologia anteriormente citada. Obteve-se como resultado que não houve alterações significativas entre pontos amostrais dos dois empreendimentos ($p < 0,05$). Os resultados do Teste de Wilcoxon para cada ponto amostral foram os seguintes: Montante do reservatório (P1) não houve diferença significativa ($p = 0,94$); Barramento - Superfície (P2/P4) não houve diferença significativa ($p = 0,55$); Barramento – Meio (P2/P4) não houve diferença significativa ($p = 0,37$); Barramento – Fundo (P2/P4) não houve diferença significativa ($p = 0,44$); Jusante do Barramento (P4/P3) não houve diferença significativa ($p = 0,50$); Casa de Força (P3/P2) não houve diferença significativa ($p = 0,32$); Portanto, podemos afirmar que, para os valores obtidos para a DBO, não foram descobertas evidências que comprovem a existência de efeitos cumulativos causados pela operação dos empreendimentos em estudo. Inclusive, vale ressaltar o valor obtido para DBO no ponto a montante do reservatório, o qual informa que os valores são muito similares entre ambos os empreendimentos.

Para os valores de Fósforo Total, aos conjuntos de dados que não apresentaram tendência de distribuição normal conforme o teste de normalidade, foi então aplicado o teste de Wilcoxon para cada ponto correspondente entre um empreendimento e outro, de acordo com metodologia anteriormente citada. Obteve-se como resultado que não houve alterações significativas entre pontos amostrais dos

dois empreendimentos ($p < 0,05$). Os resultados do Teste de Wilcoxon para cada ponto amostral foram os seguintes: Montante do reservatório (P1) não houve diferença significativa ($p = 0,47$); Barramento - Superfície (P2/P4) não houve diferença significativa ($p = 0,10$); Barramento – Meio (P2/P4) não houve diferença significativa ($p = 0,64$); Barramento – Fundo (P2/P4) não houve diferença significativa ($p = 0,27$); Jusante do Barramento (P4/P3) não houve diferença significativa ($p = 0,38$); Casa de Força (P3/P2) não houve diferença significativa ($p = 0,15$); Portanto, podemos afirmar que, para os valores obtidos para o Fósforo Total, não foram descobertas evidências que comprovem a existência de efeitos cumulativos causados pela operação dos empreendimentos em estudo.

Para os valores de Nitrato, aos conjuntos de dados que não apresentaram tendência de distribuição normal conforme o teste de normalidade, foi então aplicado o teste de Wilcoxon para cada ponto correspondente entre um empreendimento e outro, de acordo com metodologia anteriormente citada. Obteve-se como resultado que não houve alterações significativas entre pontos amostrais dos dois empreendimentos ($p < 0,05$). Os resultados do Teste de Wilcoxon para cada ponto amostral foram os seguintes: Montante do reservatório (P1) não houve diferença significativa ($p = 0,05$); Barramento - Superfície (P2/P4) não houve diferença significativa ($p = 0,53$); Barramento – Meio (P2/P4) não houve diferença significativa ($p = 0,66$); Barramento – Fundo (P2/P4) não houve diferença significativa ($p = 0,66$); Jusante do Barramento (P4/P3) não houve diferença significativa ($p = 0,57$); Casa de Força (P3/P2) não houve diferença significativa ($p = 0,43$); Portanto, podemos afirmar que, para os valores obtidos para o Nitrato, não foram descobertas evidências que comprovem a existência de efeitos cumulativos causados pela operação dos empreendimentos em estudo. Vale ressaltar, que apesar de não haver valores abaixo da convenção adotada ($p < 0,05$), o resultado obtido para o ponto a montante do reservatório encontra-se no limite desta, podendo, portanto, indicar uma tendência de acumulação de efeitos para esta localidade amostral.

Para os valores de Oxigênio Dissolvido, aos conjuntos de dados que apresentaram tendência de distribuição normal conforme o teste de normalidade, foi então aplicado o Teste T Pareado para cada ponto correspondente entre um empreendimento e outro, de acordo com metodologia anteriormente citada. Obteve-

se como resultado que não houve alterações significativas entre pontos amostrais dos dois empreendimentos. Os resultados do Teste T Pareado para cada ponto amostral foram os seguintes: Montante do reservatório (P1) não houve diferença significativa ($p = 0,48$); Barramento – Superfície (P2/P4) não houve diferença significativa ($p = 0,91$); Barramento – Meio (P2/P4) não houve diferença significativa ($p = 0,60$). Aos grupos que não passaram no teste de normalidade, foi então aplicado o Teste de Wilcoxon para cada ponto correspondente entre os empreendimentos, de acordo com metodologia anteriormente citada. Obteve-se como resultado que não houve alterações significativas entre pontos amostrais dos dois empreendimentos. Os resultados do Teste de Wilcoxon para cada ponto amostral foram os seguintes: Barramento – Fundo (P2/P4) não houve diferença significativa ($p = 0,75$); Jusante do Barramento – Fundo (P4/P3) não houve diferença significativa ($p = 1,0$); Jusante da Casa de Força (P3/P2) não houve diferença significativa ($p = 0,39$). Portanto, podemos afirmar que, para os valores obtidos para o Oxigênio Dissolvido, não foram descobertas evidências que comprovem a existência de efeitos cumulativos causados pela operação dos empreendimentos em estudo. Vale ressaltar os valores obtidos para os pontos localizados imediatamente a montante do barramento (Superfícies e Fundo), os quais indicam variação muito baixa dos dados registrados para Oxigênio Dissolvido nas campanhas de monitoramento.

Para os valores de pH, aos conjuntos de dados que apresentaram tendência de distribuição normal conforme o teste de normalidade, foi então aplicado o Teste T Pareado para cada ponto correspondente entre os empreendimentos, de acordo com metodologia anteriormente citada. Obteve-se como resultado que houve alteração significativa entre pontos amostrais dos dois empreendimentos para o ponto localizado a Jusante do Barramento. Os resultados do Teste T Pareado para cada ponto amostral foram os seguintes: Barramento – Fundo (P2/P4) não houve diferença significativa ($p = 0,63$); Jusante do Barramento (P4/P3) houve diferença significativa ($p = 0,04$); Jusante da Casa de Força (P3/P2) não houve diferença significativa ($p = 0,28$). Aos grupos que não passaram no teste de normalidade, foi então aplicado o teste de Wilcoxon para cada ponto correspondente entre um empreendimento e outro, de acordo com metodologia anteriormente citada. Obteve-se como resultado que não houve alterações significativas entre pontos amostrais dos dois empreendimentos. Os

resultados do Teste de Wilcoxon para cada ponto amostral foram os seguintes: Montante do reservatório (P1) não houve diferença significativa ($p = 0,08$); Barramento – Superfície (P2/P4) não houve diferença significativa ($p = 0,17$); Barramento – Meio (P2/P4) não houve diferença significativa ($p = 0,16$). Vale ressaltar que o valor obtido para o ponto a Montante de Reservatório é muito próximo do limite estabelecido, podendo indicar tendência de variação entre os valores de pH. Portanto, podemos afirmar que, de forma geral para os valores obtidos para o pH, não foram descobertas evidências que comprovem a existência de efeitos cumulativos causados pela operação dos empreendimentos em estudo, ainda que existam diferenças entre os pontos a jusante dos barramentos e tendências no ponto a montante do reservatório, estas aparentemente naturalmente eliminadas por processos naturais, visto que não foram detectadas diferenças significativas pelos pontos localizados a jusante da casa de força.

Para os valores de Sólidos Suspensos, aos conjuntos de dados que não apresentaram tendência de distribuição normal conforme o teste de normalidade, foi então aplicado o teste de Wilcoxon para cada ponto correspondente entre os empreendimentos, de acordo com metodologia anteriormente citada. Obteve-se como resultado que houve alterações significativas entre pontos amostrais dos dois empreendimentos ($p < 0,05$) apenas para o ponto imediatamente a jusante do barramento (P4/P3). Os resultados do Teste de Wilcoxon para cada ponto amostral foram os seguintes: Montante do reservatório (P1) não houve diferença significativa ($p = 0,59$); Barramento (P2/P4) não houve diferença significativa ($p = 0,88$); Jusante do Barramento (P4/P3) houve ($p = 0,017291$); Casa de Força (P3/P2) não houve diferença significativa ($p = 0,85$). Vale ressaltar os resultados obtidos para os pontos a montante do barramento e a Jusante da Casa de Força, os quais indicam variação muito baixa dos dados registrados para Sólidos Suspensos nas campanhas de monitoramento. Portanto, podemos afirmar que, de forma geral nos os valores obtidos para os Sólidos Suspensos, não foram descobertas evidências que comprovem a existência de efeitos cumulativos causados pela operação dos empreendimentos em estudo, ainda que existam diferenças entre os pontos a jusante dos barramentos, estas aparentemente foram gradualmente eliminadas por processos naturais, conforme detectado pelos pontos localizados a jusante da casa de força.

Para os valores de Temperatura da água, aos conjuntos de dados que apresentaram tendência de distribuição normal conforme o teste de normalidade, foi então aplicado o teste T pareado para cada ponto correspondente entre um empreendimento e outro, de acordo com metodologia anteriormente citada. Obteve-se como resultado que não houve alterações significativas entre pontos amostrais dos dois empreendimentos. Os resultados do Teste T Pareado para cada ponto amostral foram os seguintes: Montante do reservatório (P1) não houve diferença significativa ($p = 0,95$); Barramento – Superfície (P2/P4) não houve diferença significativa ($p = 0,91$); Barramento – Meio (P2/P4) não houve diferença significativa ($p = 0,76$); Barramento – Fundo (P2/P4) não houve diferença significativa ($p = 0,28$); Jusante do Barramento (P4/P3) não houve diferença significativa ($p = 0,49$); Jusante da Casa de Força (P3/P2) não houve diferença significativa ($p = 0,60$). Vale ressaltar os valores obtidos para os pontos a Montante do Reservatório e a Montante do Barramento – Superfície, os quais indicam variação muito baixa dos dados registrados para Temperatura nas campanhas de monitoramento. Portanto, podemos afirmar que, para os valores obtidos para a Temperatura da água, não existem evidências que comprovem a existência de efeitos cumulativos causados pela operação dos empreendimentos em estudo.

Para os valores de Turbidez, aos conjuntos de dados que apresentaram tendência de distribuição normal conforme o teste de normalidade, foi então aplicado o Teste T Pareado para cada ponto correspondente entre os empreendimentos, de acordo com metodologia anteriormente citada. Obteve-se como resultado que não houve alterações significativas entre pontos amostrais dos dois empreendimentos. Os resultados do Teste T Pareado para cada ponto amostral foram os seguintes: Barramento (P2/P4) não houve diferença significativa ($p = 0,85$); Jusante da Casa de Força (P3/P2) não houve diferença significativa ($p = 0,79$). Aos conjuntos de dados que não apresentaram tendência de distribuição normal conforme o teste de normalidade, foi então aplicado o Teste de Wilcoxon para cada ponto correspondente entre os empreendimentos, de acordo com metodologia anteriormente citada. Obteve-se como resultado que houve alteração significativa entre pontos amostrais dos dois empreendimentos apenas para o ponto localizado a montante do reservatório. Os resultados do teste t pareado para cada ponto amostral foram os seguintes: Montante

do reservatório (P1) houve diferença significativa ($p = 0,02$); Jusante do Barramento (P4/P3) não houve diferença significativa ($p = 0,54$). Vale ressaltar os valores obtidos para os pontos a Montante do Barramento e a Jusante da Casa de Força, os quais indicam variação muito baixa dos dados registrados para Turbidez nas campanhas de monitoramento. Portanto, podemos afirmar que, para os valores obtidos para a Turbidez, não foram descobertas evidências que comprovem a existência de efeitos cumulativos causados pela operação dos empreendimentos em estudo, ainda que existam diferenças entre os pontos imediatamente a montante dos barramentos, estas foram gradualmente eliminadas por processos naturais, conforme detectado pelos pontos localizados a jusante da casa de força.

De maneira geral, não foram descobertas evidências que comprovem a existência de efeitos cumulativos causados pela operação dos empreendimentos. Ainda que tenham sido detectadas pontualmente variações entre os pontos com localizações semelhantes, estas foram equalizadas por processos naturais previamente à chegada ao ponto a jusante da casa de força, não caracterizando, portanto, o acúmulo de efeitos entre os empreendimentos para possíveis terceiros que estejam a jusante da cascata.

5.3.1. IQA COMITESINOS

Posteriormente, foram analisados os resultados obtidos para o Índice de Qualidade da Água, o qual avalia a qualidade da água bruta integrando diversos parâmetros, conforme descrito no item 3.5.1 da revisão bibliográfica.

Aos conjuntos de dados que apresentaram tendência de distribuição normal conforme o teste de normalidade, foi então aplicado o Teste T Pareado para cada ponto correspondente entre os empreendimentos, de acordo com metodologia anteriormente citada. Obteve-se como resultado que não houve alterações significativas entre pontos amostrais dos dois empreendimentos. Os resultados do Teste T Pareado para cada ponto amostral foram os seguintes: Barramento (P2/P4) não houve diferença significativa ($p = 0,30$). Aos conjuntos de dados que não apresentaram tendência de distribuição normal conforme o teste de normalidade, foi

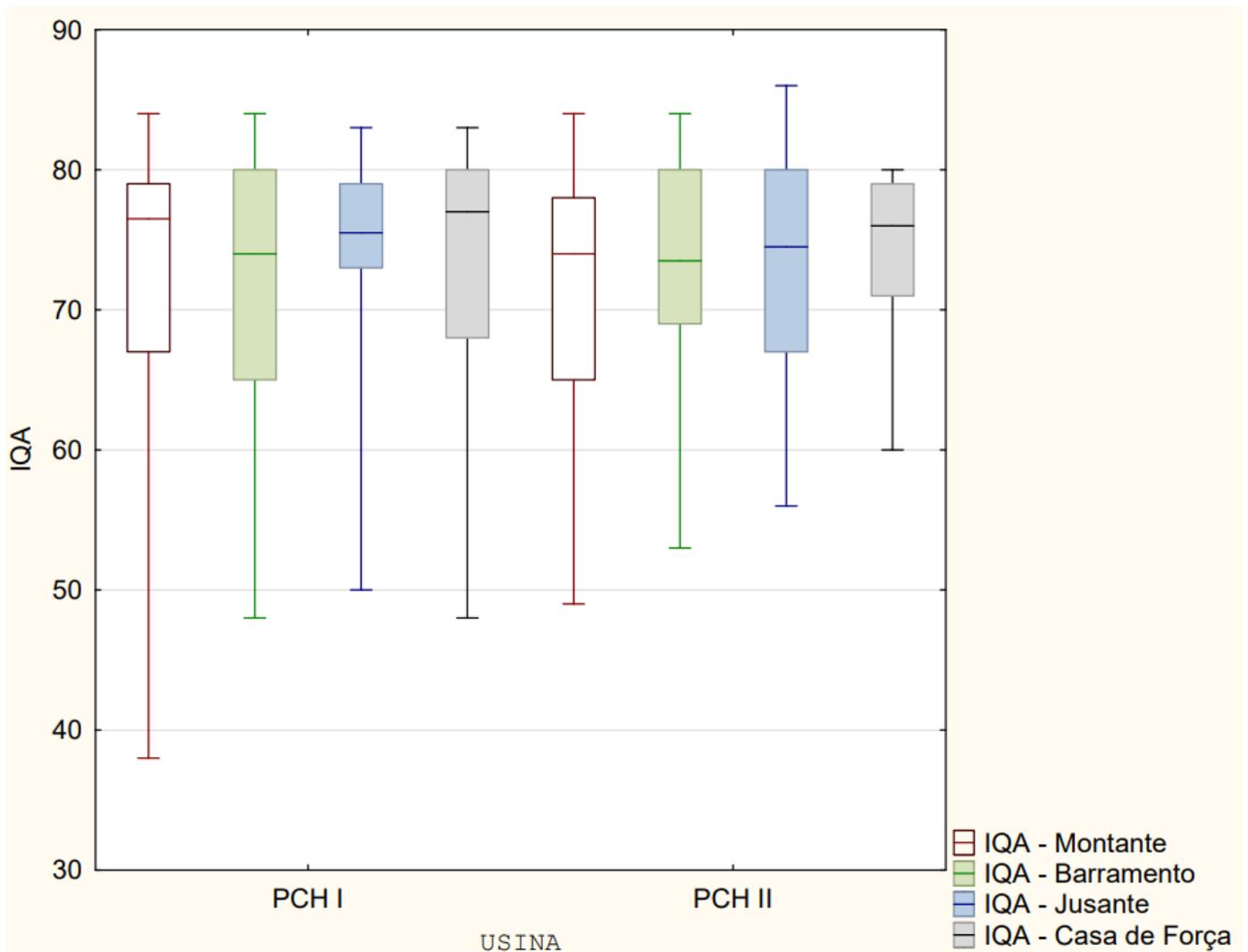
então aplicado o Teste de Wilcoxon para cada ponto correspondente entre os empreendimentos, de acordo com metodologia anteriormente citada. Obteve-se como resultado que não houve alterações significativas entre pontos amostrais dos dois empreendimentos. Os resultados do Teste de Wilcoxon para cada ponto amostral foram os seguintes: Montante do reservatório não houve diferença significativa ($p = 0,81$); Jusante do Barramento (P4/P3) não houve diferença significativa ($p = 0,61$); Jusante da Casa de Força (P3/P2) não houve diferença significativa ($p = 0,41$). Importante destacar o valor obtido para o ponto a montante do reservatório, o qual indica variação muito baixa dos dados registrados para IQA nas campanhas de monitoramento. Portanto, podemos afirmar que, para os valores obtidos para o IQA, não foram descobertas evidências que comprovem a existência de efeitos cumulativos causados pela operação dos empreendimentos em estudo.

Objetivando a conferência visual desta informação, foi elaborado o gráfico de box-plot para os diversos pontos amostrados, ilustrados pela Figura 11 (Início do reservatório; Montante do barramento; Jusante do barramento; Jusante do canal de fuga). Para o ponto localizado no início do reservatório (área de transição entre ambientes lóticos e lênticos) verifica-se aumento significativo nos valores mínimos registrados, com leve aumento no valor da mediana. Simultaneamente, os valores interquartílicos e máximos mantiveram-se praticamente constantes. Prosseguindo para o ponto imediatamente a montante do barramento, de ambiente lêntico, podemos então observar que, assim como no ponto a montante, houve o aumento dos valores mínimos, reduzindo assim a amplitude dos dados. Neste ponto amostral pode-se verificar também uma significativa aproximação dos valores interquartílicos, influenciando no aumento nos valores registrados de IQA e indicando uma melhora na condição de conservação do corpo hídrico. O terceiro ponto analisado, este imediatamente a jusante do barramento apresentou a maior alteração visual no gráfico box-plot dentre os diversos pontos analisados. Primeiramente pela grande alteração no intervalo interquartílico, a qual resultou em um aumento da amplitude de valores para a PCH II. Houve também aumento simultâneo nos valores de máximos e mínimos, indicando uma melhora nas condições gerais do ponto amostral. Apesar das variações observadas, não houve impacto visível na mediana apresentada. Por fim, o quarto ponto analisado (jusante do canal de fuga) seguiu a mesma tendência dos

demais, com um aumento significativo nos valores mínimos e uma significativa redução na amplitude do intervalo interquartilico, indicando uma possível melhora na qualidade da água. Apesar das variações observadas, a mediana manteve-se praticamente constante.

Portanto, ainda que ao longo desta etapa de análise tenham sido observadas variações quanto aos resultados do IQA COMITESINOS obtidos para ambos os empreendimentos, levando em consideração as comparações estatísticas realizadas, não possuímos evidências que comprovem a existência de efeitos cumulativos à qualidade da água causados por empreendimentos em cascata similares aos deste estudo de caso.

Figura 11 - IQA Comparativo entre empreendimentos



Fonte: Autoria própria

5.3.2. IET

Referente aos resultados obtidos para o Índice de Estado Trófico, o qual avalia a qualidade da água quanto ao enriquecimento por nutrientes e seu efeito relacionado ao crescimento excessivo de algas ou macrófitas aquáticas.

Aos conjuntos de dados que não apresentaram tendência de distribuição normal conforme o teste de normalidade, foi então aplicado o teste de Wilcoxon para cada ponto correspondente entre os empreendimentos, de acordo com metodologia anteriormente citada. Obteve-se como resultado que não houve alterações significativas entre pontos amostrais dos dois empreendimentos. Os resultados do Teste de Wilcoxon para cada ponto amostral foram os seguintes: Montante do reservatório (P1) não houve diferença significativa ($p = 1,00$); Barramento (P2/P4) não houve diferença significativa ($p = 0,61$); Jusante do Barramento (P4/P3) não houve diferença significativa ($p = 0,68$); Jusante da Casa de Força (P3/P2) não houve diferença significativa ($p = 0,91$). Importante destacar o valor obtido para os pontos a montante do reservatório e a jusante da casa de força, os quais indicam variação muito baixa dos dados registrados para IET nas campanhas de monitoramento. Portanto, podemos afirmar que, para os valores obtidos para o IET, não foram descobertas evidências que comprovem a existência de efeitos cumulativos causados pela operação dos empreendimentos em estudo.

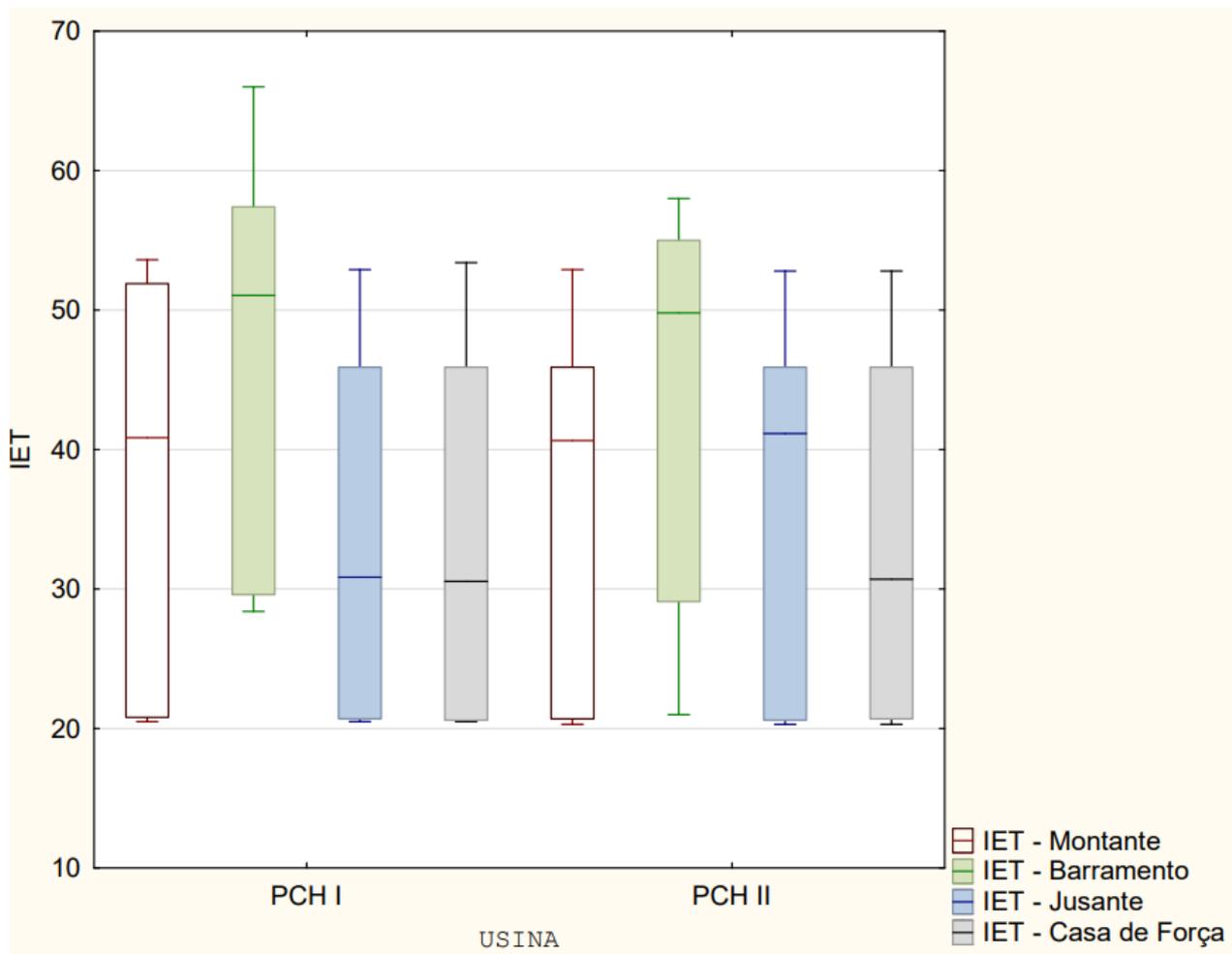
Objetivando a conferência visual desta informação, foi elaborado o gráfico de box-plot para os diversos pontos amostrados, ilustrados pela

Figura 12, (Início do reservatório; Montante do barramento; Jusante do barramento; Jusante do canal de fuga). Para o ponto localizado no início do reservatório (área de transição entre ambientes lóticos e lênticos) verifica-se que os valores de mediana e de máximos ou mínimos na sua distribuição são muito semelhantes, porém, há uma significativa redução na distância interquartil para segundo empreendimento, implicando em uma menor dispersão dos valores. Prosseguindo para o ponto imediatamente a montante do barramento, de ambiente lêntico, podemos então observar que houve redução nos valores máximos e mínimos, não alterando visivelmente a amplitude entre estes. Os valores médios mantiveram-se em aparente estabilidade. O terceiro ponto analisado, este imediatamente a jusante do barramento apresentou a distribuição de dados muito semelhante, diferenciadas apenas pelo valor da mediana, a qual encontra-se significativamente maior para o segundo empreendimento, indicando uma maior degradação do corpo hídrico no que tange aos processos de eutrofização. Por fim, o quarto ponto analisado (jusante do canal de fuga) permaneceu basicamente inalterado neste comparativo, demonstrando

uma consistência nos valores registrados para máximos, mínimos, mediana e valores interquartílicos.

Portanto, ainda que haja alterações visuais significativas para o comportamento registrado nos os pontos amostrais entre ambos os empreendimentos, não podemos afirmar que para o Índice de Estado Trófico há efeito cumulativo causado pelas PCHs em cascata. Isto se dá pelo fato de que o impacto resultante, registrado pelo último ponto amostral (jusante do canal de fuga) permaneceu inalterado para ambos os empreendimentos, indicando boa capacidade de recuperação natural para o corpo hídrico, referente aos parâmetros relacionados à eutrofização do mesmo.

Figura 12 - IET comparativo entre empreendimentos



Fonte: Autoria própria

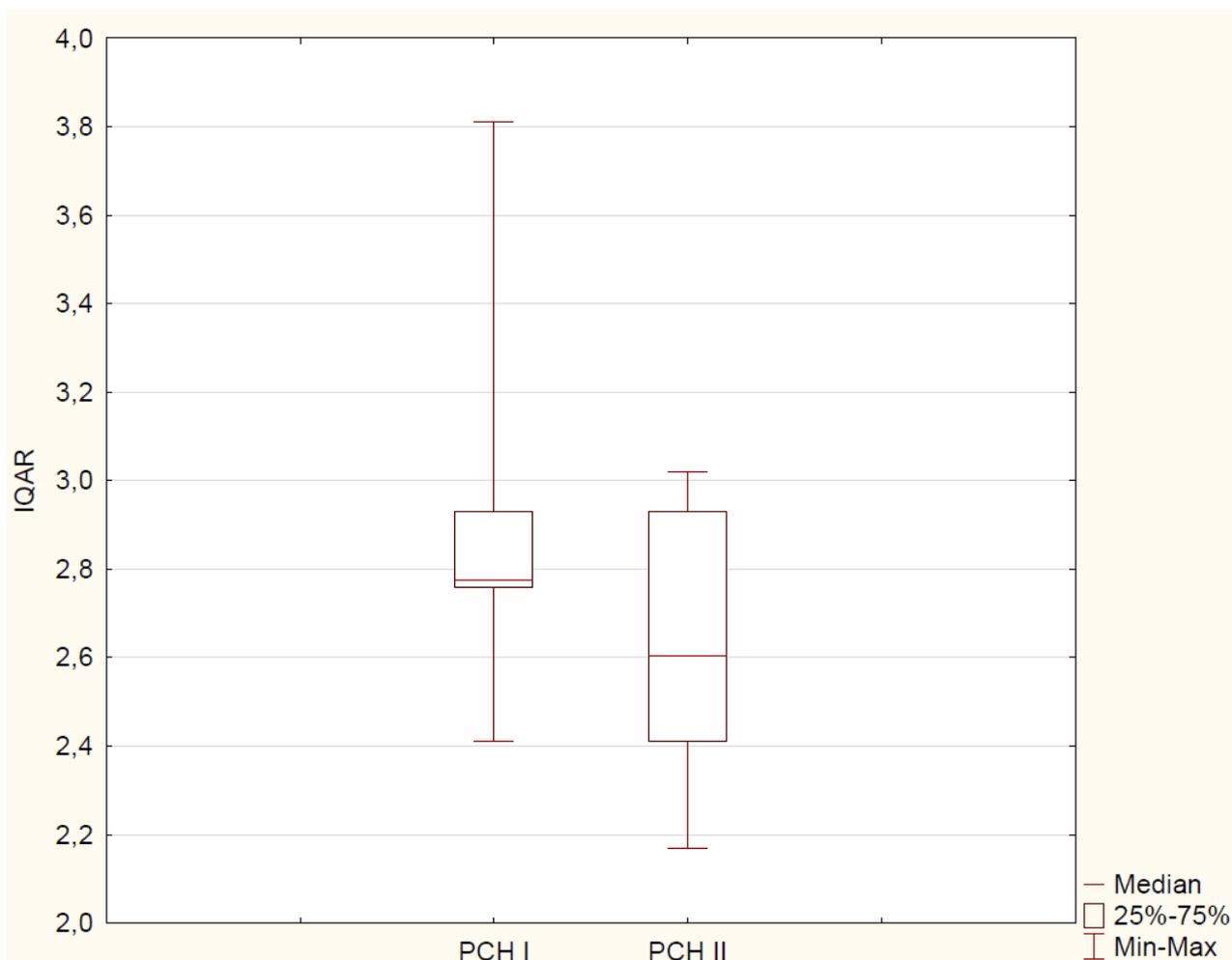
5.3.1. IQAR

Por fim, foi realizada a análise dos resultados obtidos para o Índice de Qualidade da Água em Reservatórios, o qual classifica a qualidade da água quanto ao seu grau de degradação a partir da análise de diversos parâmetros relevantes para estimativa da qualidade das águas.

Aos conjuntos de dados que não apresentaram tendência de distribuição normal conforme o teste de normalidade, foi então aplicado o Teste de Wilcoxon para os pontos correspondentes entre os empreendimentos, de acordo com metodologia anteriormente citada. Obteve-se como resultado que houve alteração significativa nos valores de IQAR. Segue o resultado do Teste de Wilcoxon para o ponto amostral: Barramento (P2/P4) houve diferença significativa ($p = 0,042696$). Este resultado é de grande relevância, uma vez que evidencia melhora estatisticamente comprovada na qualidade da água dos reservatórios, quando comparados ambos os empreendimentos.

Objetivando a conferência visual desta informação, foi elaborado o gráfico de box-plot para o ponto localizado dentro do reservatório (ambiente lântico) de ambas as PCHs. Ilustrado pela Figura 13 está o referido gráfico para devidas análises. Podemos verificar uma significativa redução nos máximos e mínimos registrados para a PCH II, porém com um aumento na dispersão entre valores presentes no intervalo interquartilico. Também foi detectada uma pequena melhora nos valores de IQAR, visto que a houve queda no valor da média, indicando uma menor degradabilidade do corpo hídrico. Vale destacar a diferença entre as análises realizadas pelo IQA e IQAR, uma vez que para o primeiro, não foram encontradas variações significativas referentes à qualidade da água dos dois empreendimentos.

Figura 13 - IQAR Comparativo entre empreendimentos



Fonte: Autoria própria

6. CONCLUSÃO

Nas condições em que foi conduzido o presente estudo de caso, pode-se concluir que:

- As análises de qualidade da água para ambos os empreendimentos indicam uma maior depreciação da qualidade da água para o ponto amostral localizado imediatamente a montante do reservatório;
- Para os empreendimentos em cascata, avaliados neste estudo foi observado que o reservatório a montante, de forma geral, apresenta qualidade de água mais degradada, de acordo com os valores obtidos para o IQAR;

- O estado de conservação encontrado para o corpo hídrico em ambos os reservatórios estudados se encontra, de forma recorrente, abaixo do desejado para certos parâmetros analisados, como: Coliformes Termotolerantes, Demanda Bioquímica de Oxigênio e Fósforo Total, necessitando de medidas adicionais que busquem atender os valores exigidos para o respectivo enquadramento da classe;
- Foi detectada tendência de aumento ao longo do tempo nos valores registrados para Fósforo Total e Temperatura da Água, sendo pontos de atenção como possíveis indicadores de desequilíbrio no ecossistema;
- Foram detectadas tendências de aumento do longo do tempo nos valores registrados para o Índice de Qualidade da Água e diminuição nos valores do Índice de Estado Trófico, podendo indicar uma melhora no estado de conservação do corpo hídrico ao longo dos anos;
- Não foram encontradas evidências que sugiram a existência de efeitos cumulativos entre os empreendimentos quando aplicadas as metodologias para o Índice de Qualidade da Água e Índice de Estado Trófico;
- Foram encontradas evidências que sugerem a existência de efeitos cumulativos entre os pontos imediatamente a montante dos barramentos destes empreendimentos quando aplicado o Índice de Qualidade da Água em Reservatórios, sendo o empreendimento a montante aquele com maior grau de degradabilidade da qualidade da água;
- Não foram encontradas evidências que sugiram a existência de efeitos cumulativos causados pelos empreendimentos estudados para terceiros que encontrem-se a jusante do último ponto amostral, quando aplicados os índices ambientais estudados;
- Para a PCH I, foram encontrados valores médios de correlação entre o IQA e IET nos pontos a montante do reservatório, a jusante do barramento e a jusante do conduto forçado, enquanto para o ponto amostral a montante do barramento foi encontrada correlação entre os valores de IET e IQAR;

- Para o empreendimento a jusante, foram encontrados valores médios de correlação entre o IQA e IET para os pontos a montante do reservatório e a montante do barramento, enquanto para os demais pontos amostrais não foram obtidas correlações entre os índices estudados;

7. RECOMENDAÇÕES

Para futuros estudos, recomendam-se alguns aspectos que poderiam ser abordados de modo a complementar as informações fornecidas por este trabalho:

- Avaliação da eficiência de programas de conscientização e educação ambiental da população a montante dos empreendimentos como ferramenta de prevenção a aportes significativos de nutrientes e toxinas, principalmente ao primeiro empreendimento da cascata;
- Visto que foram encontrados valores relativamente altos para os Coliformes Termotolerantes, Fósforo Total, Demanda Bioquímica de Oxigênio, Nitrato, pH, Sólidos Suspensos e Turbidez, seria de interesse tanto do empreendedor, quanto dos consumidores a jusante, a realização de parcerias público-privadas com instituições de ensino locais para o aprofundamento no estudo das origens destes desvios;
- Desenvolvimento e acompanhamento de medidas específicas para controle e mitigação dos efeitos negativos causados pelos barramentos em cascata ao corpo hídrico;
- Neste estudo de caso foram avaliados apenas os parâmetros relevantes para o cálculo de IQA, IET, IQAR, seria válida a realização de um estudo mais abrangente, inclusive com a adição de parâmetros qualitativos e a avaliação da população local quanto ao assunto;
- Visto que os aportes de nutrientes possuem magnitudes diferentes para cada um dos empreendimentos em cascata estudados, seria interessante avaliar o impacto desta variação na ictiofauna local;

- Tendo em mente a correlação observada para os índices ambientais utilizados neste estudo, seria de grande interesse a elaboração destas análises em empreendimentos similares e com diferentes índices;

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Portal da Qualidade das Águas. Indicadores de Qualidade - Índice do Estado Trófico (IET)**. 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **História do Uso da água no Brasil: Do descobrimento ao século XX**. 2007.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Conjuntura Recursos Hídricos Brasil 2020**. 2019.

AGOSTINHO, A.A.; GOMES L.C.; OKADA E.K. **Flood regime, dam regulation and fish in the Upper Paraná River: effects on assemblage attributes, reproduction, and recruitment**. 2004.

AGOSTINHO, A.A.; PELICICE F.M.; GOMES L.C. **Dams and the fish fauna of the Neotropical region: impacts and management related to diversity and fisheries**. 2008.

ALBARELLO, L. **Guia para a implantação de Pequenas Centrais Hidrelétricas – PCHs**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso de Pós-Graduação. Universidade Federal de Santa Maria. Panambi, RS, 2014.

ANDRADE, E. M. D.; ARAÚJO, L. D. F. P.; ROSA, M. F.; DISNEY, W.; ALVES, A. B. **Seleção dos indicadores da qualidade das águas superficiais pelo emprego da análise multivariada**.

ANEEL, A. N. DE E. E. **BIG - Banco de Informações de Geração**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 20 fev. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PCHs E CGHs (ABRAPCH). **Boletim Bimestral 01/2020**. Brasil: Curitiba, 2020.

BAXTER RM. **Environmental effects of dams and impoundments**. Annu Rev Ecol. Syst. 1977.

BATTARBEE, R.W., BENNION, H., 2011. **Palaeolimnology and its developing role in assessing the history and extent of human impact on lake ecosystems**. J. Paleolimnol. 45, 399–404.

BERMANN, C. **Impasses e controvérsias da hidroeletricidade**. Estudos Avançados, São Paulo, v. 59, n. 21, p.139-153, fev. 2007.

BRASIL, C. N. DO M. A. C. - Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. In: **Diário Oficial da União, 18 mar.** Brasília: [s.n.].

BRASIL, **Resolução CONAMA nº 237, de 19 de dezembro de 1997**. Dispõe sobre a revisão e complementação dos procedimentos e critérios utilizados para o licenciamento ambiental.

BROWN, R.; MCCLEILLAND, N.; DEININGER, R.; TOZER, R.; **A water quality index—do we dare?**. Proceedings, National Symposium on Data and Instrumentation for Water Quality Management. 117. 339-343. 1970.

BRUSSEAU, M. L.; TICK, G. R. **Environmental and pollution science**. San Diego: Elsevier, 2006.

CAO, X.; CYUZUZO, C. M.; SAIKEN, C.; SONG, B.; **A linear additivity water resources assessment indicator by combining water quantity and water quality**, Ecological Indicators, Volume 121, 2021.

CASTRO, N. J.; MARTINS, S.; BRANDÃO, R.; DANTAS, G; TIMPONI, R. **A importância das fontes alternativas e renováveis na evolução da matriz elétrica brasileira**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2009.

CARLSON, R. E. **A trophic state index for lakes**. Limnology and Oceanography. [s.l: s.n.].

CARAPETO, C. **Poluição das águas**. Lisboa: Universidade Aberta, 1999.

CARVALHO, O. A. **Água sobre a terra: lugar e territorialidade na implantação de grandes hidrelétricas.** 2006.

CHANG, B.; CHEN, H. W.; NING, S. K.; **Identification of river water quality using the Fuzzy Synthetic Evaluation approach,** Journal of Environmental Management, Volume 63, Issue 3, 2001.

COIMBRA, C. M., **Avaliação da Metodologia IQAFAL nas Bacias Contribuintes à Lagoa Rodrigo de Freitas.** Dissertação (Mestrado). Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental. Rio de Janeiro/RJ, Brasil. PPEA/UERJ, 2011.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Qualidade das Águas Interiores no Estado de São Paulo. Apêndice D Índices de Qualidade das Águas Índice.** [s.l: s.n.].

COUILLARD, D; LEFEBVRE, Y. (1985) **Analysis of Water Quality Indices.** Journal of Environmental Management, 21, 161-179.

CRUZ, H. C.; FABRIZY, N. L. P. **Impactos ambientais de reservatórios e perspectivas de uso múltiplo.** Revista Brasileira de Energia. v. 4, n. 1, 1995.

DOBRUSZKES, F.; EFTHYMIU, M.; **When environmental indicators are not neutral: Assessing aircraft noise assessment in Europe,** Journal of Air Transport Management, Volume 88, 2020.

ELETROBRÁS/ ANEEL. **Diretrizes para elaboração de projeto básico de usinas hidrelétricas,** 1999

EPE, E DE. E.; **Balanco energético nacional 2011: Ano base 2010.** Rio de Janeiro: EPE, 2011

EPE, E. DE P. E. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2020 ano base 2019 Statistical Yearbook of electricity 2019 baseline year** MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. [s.l: s.n.].

ESPEJO, L., KRESTSCHNER, N., OYARZÚN, J., MEZA, F., NÚÑEZ, J., MATURANA, H., SOTO, G., OYARZO, P. GARRIDO, M., SUCKEL, F., AMEGAZA, J.,

OYARZÚN, R. **Application of water quality indices and analysis of the surface water quality monitoring network in semiarid North – Central, Chile.** Environmental Monitoring and Assessment, n. 1894, p.5571-5588, 2012.

ESTEVEZ, F.A. 1998. **Fundamentos de Limnologia.** Interciência, Rio de Janeiro. 602 pp.

FGV ENERGIA. **Reservatórios Artificiais e seus efeitos no Balanço Hídrico Nacional.** 2019

FRÁGUAS P. S.; POMPEU P. S.; **Hydropower affects fish trophic structure both downstream of the dam and upstream of the reservoir.** Neotrop Ichthyol. 2021;

FRANCA, L. P. **Indicadores ambientais urbanos: revisão da literatura.** Parceria 21, 2001.

GANASSIN, M. J. M.; MUNÕZ-MAS, R.; OLIVEIRA, F. J. M. O.; MUNIZ, C. M.; SANTOS, N. C. L. GARCIA-BERTHOU, E. GOMES, L. C.; **Effects of reservoir cascades on diversity, distribution, and abundance of fish assemblages in three Neotropical basins,** Science of The Total Environment, Volume 778, 2021,

GUIMARÃES JR, C; LEOPOLDO, R. P; CRUZ, A. J; FONTANA, S. C. **Aspecto limnológico do reservatório de Ibitinga-SP.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos. V.3 n.1 jan/mar, 1998. p.89-103

HAMMOND, A., et al. **Environmental indicators: a systematic approach to measuring and reporting on environmental policy performance in the context of sustainable development.** Washington, D.C.: World Resources Institut, 1995.

HENRY, R. **Ecologia de reservatórios: estrutura, função e aspectos sociais.** Botucatu: Fapesp, FUNDIBIO, 1999

HERMAN, K. S.; SHENK, J.; **Pattern Discovery for climate and environmental policy indicators,** Environmental Science & Policy, Volume 120, 2021.

LAMPARELLI, M. C. **Grau de trofia em corpos d'água do estado de são paulo: avaliação dos métodos de monitoramento.** [s.l.] Universidade de São Paulo, 2004.

LERMONTOV, A., **Novo Índice de Qualidade das Águas com uso da Lógica e Inferência Nebulosa.** Tese (Doutorado). Universidade do Federal do Rio de Janeiro. Programa de Pós-graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos da Escola de Química. Rio de Janeiro/RJ, Brasil. EQ/UFRJ, 2009.

LI R.; ZOU, Z.; AN, Y.; **Water quality assessment in Qu River based on fuzzy water pollution index method,** Journal of Environmental Sciences, Volume 50, 2016.

LIU, B.; DU, H.; FAN, J.; HUANG, B; HUANG, K.; GONG, J.; **The gap between public perceptions and monitoring indicators of environmental quality in Beijing,** Journal of Environmental Management, Volume 277, 2021.

MAVARA, T.; PARSONS, C.; RIDENOUR C.; STOJANIVIC S.; DURR H.; POWLEY H.; VAN CAPPELLEN P.; (2015). **Global phosphorus retention by river damming.** Proceedings of the National Academy of Sciences. 112. 201511797. 10.1073/pnas.1511797112.

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 Sanitaria e Ambiental, v. 20, n. 4, p. 613–622, 2015.

MARANHÃO, N., **Sistema de Indicadores para Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos de Bacias Hidrográficas.** Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Programa de Engenharia Civil/COPPE. Rio de Janeiro/RJ, Brasil. UFRJ/COPPE, 2007.

MATEO-SAGASTA, J.; BURKE, J. Agriculture, and water quality interactions: a global overview. **SOLAW Background Thematic Report,** v. TR08 FAO., 2010.

MIMMS, M.; OLDEN, J.; (2012). **Life history theory predicts fish assemblage response to hydrologic regimes.** Ecology. 93. 35-45. 10.2307/23144019.

Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Procedimentos de Licenciamento Ambiental do Brasil**, 2018.

MORAES, L.A.F. (2009) **A visão integrada da ecohidrologia para o manejo sustentável dos ecossistemas aquáticos**. *Oecologia Brasiliensis*, v. 13, n. 4, p. 676-687

OLADIPO, J. O.; AKINWUMIJU, A. S.; ABOYEII; O. S.; ADELODUN, A. A.; **Comparison between fuzzy logic and water quality index methods: A case of water quality assessment in Ikare community, Southwestern Nigeria**, *Environmental Challenges*, Volume 3, 2021.

OLIVEIRA, T. F.; BRANDAO, I. L. S.; MANNAERTS, C. M.; HAUSER-DAVIS, R. A.; OLIVEIRA, A. A. F.; SARAIVA, A. C. F.; OLIVEIRA, M. A.; ISHIHARA, J. H.; **Using hydrodynamic and water quality variables to assess eutrophication in a tropical hydroelectric reservoir**, *Journal of Environmental Management*, Volume 256, 2020.

POFF, N.L., OLDEN, J.D., MERRITT, D.M., PEPIN, D.M., 2007. **Homogenization of regional river dynamics by dams and global biodiversity implications**

POFF, N. (2017). **Beyond the natural flow regime? Broadening the hydro-ecological foundation to meet environmental flows challenges in a non-stationary world**. *Freshwater Biology*. 63. 1-11. 10.1111/fwb.13038.

PORTAL PCH; **O Banco Mundial e as Hidrelétricas**. 2009

PORTO, R.L.L. (Org.). (1991) **Hidrologia Ambiental**. 1 ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo: Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Coleção ABRH de Recursos Hídricos, v.3. 411 p.

ROBERTO M.C.; SANTANA. N.F.; THOMAS S.M., 2009. **Limnology in the Upper Paraná River floodplain: large-scale spatial and temporal patterns, and the influence of reservoirs**.

SHÁNCHEZ, L. (2013). **Avaliação de Impacto Ambiental: Conceitos e Métodos**, 2a. edição.

SETTI, A. A. ET AL., 2001. **Introdução ao gerenciamento de recursos hídricos**. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica/Agência Nacional das Águas, 2001.

SHI W.; CHEN Q.; YI Q.; YU J.; JI Y.; HU L.; CHEN Y. **Carbon emission from cascade reservoirs: Spatial heterogeneity and mechanisms**. Environ. Sci. Technol., 2017.

SHWETANK, S.; CHAUDHARY, J. K.; **A Comparative Study of Fuzzy Logic and WQI for Groundwater Quality Assessment**, Procedia Computer Science, Volume 171, 2020.

SOARES, M. C. S.; MARINHO, M. M.; HUSZAR, V. L. M.; BRANCO, C. W. C.; AZEVEDO, S. M. F. O. **The effects of water retention time and watershed features on the limnology of two tropical reservoirs in Brazil**. Lakes & Reservoir: Reserarch & Management, v. 14, n. 4, p. 257-269, 2008.

SOUZA, I. V. A.; SOUZA, R. DE O.; PAULINO, W. D. **Cálculo do índice de estado trófico em reservatório com estudo de caso no reservatório Acarape do Meio**. São Carlos,SP: [s.n.].

TONIOLO, B. P.; Metodologia de avaliação de degradação ambiental utilizando técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto na bacia hidrográfica do Rio Cotia – SP.

TUNDISI, J.G. (2001) **Planejamento e gerenciamento de lagos e reservatórios: uma abordagem integrada ao problema da eutrofização**. Osaka: IETC - UNEP. 383p. (Série de publicações técnicas).

TUNDISI, JG. and MATSUMURA-TUNDISI, T. 2008. **Limnologia**, Oficina de Textos. 632 p.

TUNDISI J.G.; TUNDSI-MATSUMURA, T. **As múltiplas dimensões da crise hídrica**, 2015.

TUNDISI, J. G. Gerenciamento Integrado de Bacias Hidrográficas e Reservatórios Estudos de Caso e Perspectivas. In: NOGUEIRA, M. G.; HENRY, R. e

JORCIM, A. (Ed.). **Ecologia de reservatórios: impactos potenciais, ações de manejo e sistemas em cascata**. São Carlos: Editora Rima, 2005. P. 1-24.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3 ed. v.1 ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais, 2005.

WALZ, A.; HUGHES, A.; BONNET, Pa.; BASSON, **As barragens e a água do mundo**. Paris: ICOLD-CIGB, 2008.

WINEMILLER, K.O., MCINTYRE, P.B., CASTELLO, L., FLUET-CHOUINARD, E., GIARRIZZO, T., NAM, S., BAIRD, I.G., DARWALL, W., LUJAN, N.K., HARRISON, I., STIASSNY, M.L.J., SILVANO, R.A.M., FITZGERALD, D.B., PELICICE, F.M., AGOSTINHO, A.A., GOMES, L.C., ALBERT, J.S., BARAN, E., PETRERE JUNIOR, M., ZARFL, C., MULLIGAN, M., SULLIVAN, J.P., ARANTES, C.C., SOUSA, L.M., KONING, A.A., HOEINGHAUS, D.J., SABAJ, M., LUNDBERG, J.G., ARMBRUSTER, J., THIEME, M.L., PETRY, P., ZUANON, J., VILARA, G.T., SNOEKS, J., OU, C., RAINBOTH, W., PAVANELLI, C.S., AKAMA, A., SOESBERGEN, A. and SAENZ, L. **Balancing hydropower and biodiversity in the Amazon, Congo, and Mekong**. Science, 2016

YANG, X.; WU X.; HAO H.; HE Z.; **Mechanisms and assessment of water eutrophication**. Journal of Zhejiang University Science, v. 9, n. 3, p. 197–209, 2008.

YANG Z.; ZHU D.; ZHU Q.; HU L.; WAN C.; ZHAO N.; LIU H.; CHEN X.; **Development of new fish-based indices of biotic integrity for estimating the effects of cascade reservoirs on fish assemblages in the upper Yangtze River, China**, Ecological Indicators, Volume 119, 2020,

YUAN Q.; WANG P.; CHEN J. WANG C.; LIU S.; WANG X.; **Influence of cascade reservoirs on spatiotemporal variations of hydrogeochemistry in Jinsha River**, Water Science and Engineering, Volume 14, Issue 2, 2021