



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

Germano Alves de Sousa Pirajá Martins

**Avaliação do Impacto Antrópico na Água Superficial do Trecho do Rio Uruguai
Influenciado pela Usina Hidrelétrica Foz do Chapecó**

FLORIANÓPOLIS
2020

Germano Alves de Sousa Pirajá Martins

**Avaliação do Impacto Antrópico na Água Superficial do Trecho do Rio Uruguai
Influenciado pela Usina Hidrelétrica Foz do Chapecó**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Cátia Regina Silva de Carvalho Pinto

Coorientador: Prof. Dr. Davide Franco

Florianópolis

2020

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

Martins, Germano Alves de Sousa Pirajá
Avaliação do Impacto Antrópico na Água Superficial do
Trecho do Rio Uruguai Influenciado pela Usina Hidrelétrica
Foz do Chapecó / Germano Alves de Sousa Pirajá Martins ;
orientadora, Cátia Regina Silva de Carvalho Pinto,
coorientador, Davide Franco, 2020.
134 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Ambiental, Florianópolis, 2020.

Inclui referências.

1. Engenharia Ambiental. 2. Impacto Ambiental. 3.
Qualidade da Água. 4. Hidrologia. 5. Rio Uruguai. I.
Pinto, Cátia Regina Silva de Carvalho. II. Franco, Davide.
III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. IV. Título.

Germano Alves de Sousa Pirajá Martins

**Avaliação do Impacto Antrópico na Água Superficial do Trecho do Rio Uruguai
Influenciado pela Usina Hidrelétrica Foz do Chapecó**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca
examinadora composta pelos seguintes membros:

Professor Doutor Pedro Luiz Borges Chaffe
Universidade Federal de Santa Catarina

Doutor Daniel Mansur Pimpão
Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi
julgado adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia Ambiental.

Professora Doutora Maria Eliza Nagel Hassemer
Coordenadora do Programa

Professora Doutora Cátia Regina Silva de Carvalho Pinto
Orientadora

Florianópolis, 2020.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a minha família, pai, mãe, avó, irmãos pelo suporte e incentivo em todos os momentos.

À Professora Cátia pela confiança, incentivo e orientações, que ajudaram a guiar o trabalho.

Ao Professor Davide pelos ensinamentos, paciência e o tempo dedicado à coorientação, que foi essencial a elaboração dessa dissertação.

Aos colegas de pesquisa, em especial, Kleber, Tadeu e Marina, pelos conselhos e ajuda durante o período de elaboração da dissertação.

Aos colegas do PPGEA pela colaboração durante as disciplinas e encontros na UFSC.

Aos amigos que tiveram a paciência para escutar as dificuldades e puderam proporcionar momentos de alegria durante essa jornada.

Ao IBAMA pelo trabalho em prol do meio ambiente e por permitir e incentivar o aperfeiçoamento de seus servidores.

Aos colegas do IBAMA, em especial os lotados no Núcleo de Licenciamento Ambiental de Santa Catarina, que ajudaram antes e durante meu afastamento a viabilizar a realização do mestrado, e também pelo esforço extra para suprir a ausência de um servidor nesse período.

Ao PPGEA, representados por seus servidores e professores, que mantém a qualidade do curso e realizam trabalhos de relevância ambiental e científica.

À UFSC que oferece, em ambiente plural e democrático, ensino superior de excelência no país.

RESUMO

A quantidade e qualidade da água são fatores preponderantes para manutenção do equilíbrio ecológico e para as atividades humanas. A implantação de usinas hidrelétricas traz uma série de consequências ambientais e avaliação dos impactos sobre a água é uma necessidade. Em função dessa situação, o objetivo do presente trabalho foi avaliar o impacto antrópico causado na água superficial na área influenciada pela implantação da Usina Hidrelétrica de Foz do Chapecó. Com base nesse objetivo, o trabalho foi realizado em três vertentes: a avaliação de aspectos relacionados à vazão no rio Uruguai e contribuintes; a avaliação das cargas médias das variáveis Nitrogênio Total, Fósforo Total e Cloretos no reservatório; e a avaliação da qualidade da água e os impactos relacionados à implantação da usina. Os resultados mostraram que as interferências antrópicas causaram alterações nas vazões extremas que passam pelo trecho. Com o dimensionamento das cargas de Nitrogênio, Fósforo e Cloretos no reservatório, foi possível constatar que a principal contribuição de entrada das variáveis avaliadas é a que vem da UHE de Itá, seguida das cargas originárias do rio Passo Fundo e Irani. Em relação à qualidade da água foi possível constatar que existem três grupos de localidades com qualidade de água distinta na rede de monitoramento. No trecho do rio Uruguai que sofreu alteração do regime hídrico em função do barramento, as variáveis de qualidade da água Temperatura, Oxigênio Dissolvido, pH, Sólidos Totais e Coliformes Fecais sofrem influência em função de sua localização no interior do reservatório. A sazonalidade hidrológica também afeta a qualidade da água. No período de cheias a Turbidez, Oxigênio Dissolvido, Ferro Total, Nitrato, DQO e Coliformes Fecais são maiores e as variáveis Temperatura da Água e Transparência menores. Por fim, foi identificado que a implantação da usina, em especial a formação do reservatório, causou majoração da Temperatura da Água e Coliformes Totais e redução de Sólidos Totais, Nitrogênio Total, Fósforo Total, DQO e Coliformes Fecais no trecho do rio Uruguai onde o reservatório de Foz do Chapecó se formou.

Palavras-chave: Hidrologia. Impacto ambiental. Qualidade da Água. UHE Foz do Chapecó. Rio Uruguai.

ABSTRACT

The quantity and quality of water are major factors for maintaining ecological balance and for human activities. The implementation of hydroelectric plants has a series of environmental consequences and an assessment of the impacts on water is a necessity. Due to this situation, the objective of this study was to evaluate the anthropic impact caused on surface water in the area influenced by the implementation of the Foz do Chapecó Hydroelectric Power Plant. Based on this objective, the work was carried out in three areas: the evaluation of aspects related to the flow in the Uruguay River and tributaries; the evaluation of the average loads of the variables Total Nitrogen, Total Phosphorus and Chlorides in the reservoir; and the assessment of water quality and impacts related to the plant's implementation. The results showed that anthropic interferences caused changes in the extreme flows that pass through the stretch. With the dimensioning of the loads of Nitrogen, Phosphorus and Chlorides in the reservoir, it was possible to verify that the main input contribution of the evaluated variables is that which comes from the Itá HPP, followed by the loads from the Passo Fundo and Irani rivers. Concerning water quality, it was found that there are three groups of locations with different water quality in the monitoring network. In the stretch of the Uruguay River that has changed the water regime due to the dam, the water quality variables Temperature, Dissolved Oxygen, pH, Total Solids and Fecal Coliforms are influenced by their location inside the reservoir. Hydrological seasonality also affects water quality. During the flood period, Turbidity, Dissolved Oxygen, Total Iron, Nitrate, COD and Fecal Coliforms are higher and the variables Water Temperature and Transparency are lower. Finally, it was identified that the implementation of the plant, especially the formation of the reservoir, caused an increase in the Water Temperature and Total Coliforms and a reduction in Total Solids, Total Nitrogen, Total Phosphorus, COD and Fecal Coliforms in the section of the Uruguay River where Foz do Chapecó reservoir was formed.

Keywords: Hydrology. Environmental impact. Water quality. HPP Foz do Chapecó. Uruguay River.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sequência metodológica da análise dos dados.	44
Figura 2 - Mapa de localização da área de estudo da qualidade da água no alto Uruguai.....	45
Figura 3 - A região de interesse e o layout geral do empreendimento de geração hidrelétrica UHE Foz do Chapecó.....	46
Figura 4 - Área das bacias de contribuição para o rio Uruguai, no trecho afetado pela usina de Foz do Chapecó.....	47
Figura 5 - Mapa com a localização das estações fluviométricas utilizadas no trabalho.	49
Figura 6 - Mapa com a localização dos pontos das campanhas de monitoramento da qualidade de água e descritos por Dal Magro (2015).....	51
Figura 7 - Esquema de entrada de cargas no reservatório da UHE Foz do Chapecó. Sendo: U1M – Uruguai Montante; U5M – Uruguai Jusante da Barragem; T1M – Rio Ararinha; T2M – Rio Irani; T3M – Rio Passo Fundo; T4M – Rio Tigre; T5M – Rio dos Índios; T6M – Rio Lambedor; T7M – Rio Bonito.....	60
Figura 8 - Linha do tempo dos valores médios, mínimos e máximos mensais por ano, no local da barragem de Foz do Chapecó.	64
Figura 9 - Curva de permanência para os três períodos hidrológicos na UHE Foz do Chapecó.....	67
Figura 10 - Climatologia da vazão proporcional para os três períodos hidrológicos na barragem da UHE Foz do Chapecó, rio Uruguai, considerando um desvio padrão acima e abaixo da média como faixa de amplitude.....	68
Figura 11 - Variação de vazões entre as décadas em épocas de cheia e seca em Foz do Chapecó.....	69
Figura 12 - Áreas de contribuição dos pontos de qualidade da água da UHE Foz do Chapecó.....	71
Figura 13 - Gráfico com as concentrações de Cloretos. (A) Linha do tempo, com o marco que indica a data de fechamento da barragem. (B) Boxplot separado por laboratório.	77
Figura 14 - Gráfico com as concentrações de Coliformes Totais - CoT. (A) Linha do tempo, com o marco que indica a data de fechamento da barragem e elipse verde	

apontando anomalia nos valores máximos de CoT. (B) Boxplot separado por laboratório.	78
Figura 15 - Concentração de Fósforo Total - PT. (A) Boxplot com a distribuições ao longo dos anos, com destaque para os anos 2016-2018. (B). Boxplot a distribuição dos resultados por laboratório.	79
Figura 16 - Distribuição e gráfico quanti-quantil de pH sem a transformação sugerida na Box-Cox.....	87
Figura 17 - Série temporal com cargas de entrada de Nitrogênio Total a montante do reservatório de Foz do Chapecó.	90
Figura 18 - Série temporal de saídas e entradas de carga de Fósforo Total no reservatório de Foz do Chapecó.	90
Figura 19 - Mapa com as cargas específicas de Nitrogênio Total produzidas por área da bacia hidrográfica de montante do reservatório da UHE Foz do Chapecó.....	92
Figura 20 - Mapa com as cargas específicas de Fósforo Total produzidas por área da bacia hidrográfica de montante do reservatório da UHE Foz do Chapecó.....	93
Figura 21 - Mapa com as cargas específicas de Cloretos produzidas por área da bacia hidrográfica de montante do reservatório da UHE Foz do Chapecó.....	94
Figura 22 - Correlação entre variáveis de qualidade da água pelos métodos de Pearson (acima da diagonal) e de Spearman (abaixo da diagonal).....	95
Figura 23 - Resultado do PCA, com as amostras de qualidade da água separadas por Pontos e as cargas para os fatores 1 e 2.....	97
Figura 24 - Dendrograma do resultado da aplicação do agrupamento hierárquico nos pontos de monitoramento de qualidade da água	100
Figura 25 - Resultado da aplicação do K-means aos dados de qualidade da água para os dois principais eixos.	101
Figura 26 - Diagrama unifilar indicando os pontos e seus respectivos agrupamentos.	101
Figura 27 - PCA com as amostras agrupadas de acordo com as técnicas de <i>clusters</i>	103
Figura 28 - Boxplots dos grupos de localidades dos pontos de amostragem para as variáveis de qualidade da água com diferença significativa: a) Temperatura – TA; b) Turbidez – Tur; c) Transparência – Trp; d) Sólidos Totais – ST; e) Oxigênio Dissolvido - OD; f) pH; g) Cloretos - Cl; h) Ferro Total – Fe; i) Nitrogênio Total – NT; j) Nitrato -	

NO ₃ ; k) Fósforo Total – PT; l) Demanda Química de Oxigênio – DQO; m) Coliformes Fecais – CoF; e n) Coliformes Totais - CoT.....	105
Figura 29 - Boxplots dos resultados das variáveis de qualidade da água nos pontos do reservatório com diferenças significativas, segundo o teste de hipótese. Sendo: a) Temperatura – TA; b) Sólidos Totais – ST; c) Oxigênio Dissolvido - OD; e) pH; f) Coliformes Fecais – CoF.	107
Figura 30 - Boxplots das variáveis de qualidade da água com diferença significativa nos períodos de cheia e seca. Sendo: a) Temperatura – TA; b) Turbidez – Tur; c) Transparência – Trp; d) Oxigênio Dissolvido - OD; e) Ferro Total – Fe; f) Nitrato - NO ₃ ; g) Demanda Química Oxigênio – DQO; e h) Coliformes Fecais – CoF.....	110
Figura 31 - Mapa com a posição dos pontos de monitoramento dos programas de Qualidade da Água e de Produtividade Pesqueira no trecho de reservatório de Foz do Chapecó.....	112
Figura 32 - Boxplots das diferenças entre variáveis de qualidade de água antes e depois da formação do reservatório de Foz do Chapecó. Sendo: a) Temperatura – TA; b) Sólidos Totais – ST; c) Nitrogênio Total – NT; d) Fósforo Total – PT; e) Demanda Química de de Oxigênio – DQO; f) Coliformes Fecais – CoF; e g) Coliformes Totais - CoT.	113

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Processos naturais que afetam a qualidade da água.....	25
Quadro 2 - Variáveis de qualidade da água com suas características e origens, separadas pelos aspectos físico, químico e biológico.....	27
Quadro 3 - Identificação dos pontos utilizados na avaliação da hidrologia da área. .	49
Quadro 4 - Alterações nos dados de qualidade da água realizados	76
Quadro 5 - Análise dos critérios para seleção de laboratório de análise de qualidade da água.	82
Quadro 6 - Resumo dos dados a serem analisados após a análise de consistência.	84
Quadro 7 - Grupos de localidades na rede amostral de Foz do Chapecó.....	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Disponibilidade hídrica das sub-bacias.....	48
Tabela 2 - Descrição dos pontos de monitoramento da qualidade da água do trecho do Alto Rio Uruguai e tributários.....	52
Tabela 3 - Mínimas, médias e máximas vazões mensais para os anos de 1970-2019. As linhas sombreadas indicam o funcionamento das UHEs de Itá e Foz do Chapecó.	65
Tabela 4 - Descrição dos dados de vazão para Foz do Chapecó nos diferentes períodos hidrológicos.	66
Tabela 5 - Quantis de vazão com base nas curvas de permanência de cada período no rio Uruguai.....	66
Tabela 6 - Médias e Desvios Padrão da proporção das vazões mensais e anuais para Foz do Chapecó.....	68
Tabela 7 - Áreas de contribuição e fonte de dados de vazão para os pontos de qualidade da água.....	71
Tabela 8 - Vazões médias por período nos pontos de monitoramento de qualidade da água.	72
Tabela 9 - Quantidade de dados, por tipo de informação contida em cada variável (e suas percentagens entre parênteses).....	74
Tabela 10 - Resumo da atuação dos laboratórios no monitoramento da UHE Foz do Chapecó.....	77
Tabela 11 - Limites de detecção das variáveis de qualidade da água por laboratório e os padrões normativos da Resolução CONAMA 357.....	80
Tabela 12 - Tipo de dado contido em cada variável (e suas percentagens entre parênteses) para o período do Laboratório B.....	83
Tabela 13 - Parâmetros de estatística descritiva dos dados de qualidade da água no período do laboratório B.....	85
Tabela 14 - Cálculo dos valores de lambda na transformação Box-Cox, para as variáveis de qualidade da água.....	86
Tabela 15 - Valores médios das variáveis de qualidade da água para os pontos no monitoramento reportado por Dal Magro et. al.....	88

Tabela 16 - Parâmetros das distribuições das variáveis de qualidade da água de Dal Magro et al.	88
Tabela 17 - Vazão e concentrações médias de Nitrogênio Total, Fósforo Total e Cloretos nos pontos de controle de carga.	89
Tabela 18 - Resumo de entradas e saídas das cargas de NT, PT e CI no reservatório da UHE Foz do Chapecó, com a importância relativa de cada entrada.	91
Tabela 19 - Sumário da importância dos fatores na aplicação do PCA nas variáveis de qualidade da água.	96
Tabela 20 - Cargas das variáveis nos fatores retidos no PCA.	97
Tabela 21 - Avaliação das diferenças na qualidade da água em função da posição do ponto de amostragem.	104
Tabela 22 - Resultado do teste para avaliar diferenças nos pontos de monitoramento no interior do reservatório.	107
Tabela 23 - Resultados do teste de hipótese a respeito do efeito do período hidrológico.	109
Tabela 24 - Resultado do teste de hipótese para avaliar as variáveis de qualidade da água antes e depois da formação de reservatório.	112

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Alc	Alcalinidade
ANA	Agência Nacional de Águas
ANOVA	Análise de Variância
APHA	<i>American Public Health Association</i>
Cd	Cádmio
CE	Condutividade Elétrica
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
Cl	Cloretos
CL-a	Clorofila-a
CO ₂	Dióxido de Carbono
CoF	Coliformes Fecais
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CoT	Coliformes Totais
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
DRH	Departamento de Recursos Hídricos
Dur	Dureza
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EMV	Estimador da Máxima Verossimilhança
Fe	Ferro
Fen	Fenóis
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
IQA	Índice de Qualidade da Água
KM	Método Kaplan-Meier
KMO	Teste de Kaiser-Meyer-Olkin
KW	Kruskall-Wallis
LD	Limite de Detecção
NA	<i>Not Available</i>

NBR	Norma Brasileira
NMP	Número Mais Provável
NO2	Nitrito
NO3	Nitrato
NT	Nitrogênio Total
OD	Oxigênio Dissolvido
ODS	Oxigênio Saturado
OeG	Óleos e Graxas
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PCA	Análise de Componentes Principais
PCHs	Pequenas Centrais Hidrelétricas
pH	Potencial de Hidrogênio
PO4	Fosfato Total
PT	Fósforo Total
QMLT	Vazão de Longo Termo
Q90	Vazão Média Percentual
Q95	Vazão Média Percentual
ROS	<i>Regression on Order Statistics</i>
RS	Rio Grande do Sul
SEMA	Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura do RS
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
ST	Sólidos Totais
T	Ponto no Tributário
TA	Temperatura da Água
Trp	Transparência
TU	Turbidez
U	Ponto no Uruguai
UTM	Universal Transversa de Mercator

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
2	OBJETIVOS	21
2.1	OBJETIVO GERAL	21
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
3.1	RESERVATÓRIOS	22
3.2	QUALIDADE DA ÁGUA DE UM CORPO HÍDRICO	24
3.2.1	Dados de qualidade da água	31
3.2.1.1	<i>Dados Perdidos</i>	32
3.2.1.2	<i>Dados Censurados</i>	32
3.2.1.3	<i>Outliers</i>	35
3.2.2	Análise estatística dos dados de qualidade da água	35
3.2.2.1	<i>Comparação entre dois grupos</i>	36
3.2.2.2	<i>Comparação entre mais de dois grupos</i>	37
3.2.2.3	<i>Estatística Multivariada</i>	38
3.2.2.4	<i>Análise de Agrupamento (Cluster)</i>	39
3.2.2.5	<i>Análise Fatorial/Análise de Componentes Principais (PCA)</i>	39
3.3	ESTUDOS REALIZADOS NA REGIÃO	40
4	METODOLOGIA	44
4.1	DESCRIÇÃO DA ÁREA	44
4.2	DADOS DE MONITORAMENTO HIDROLÓGICO	47
4.3	DADOS DE MONITORAMENTO DE QUALIDADE DA ÁGUA	50
4.3.1	Análise de dados de qualidade de água de Programa de Produtividade Pesqueira	52
4.4	ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS	53
5	RESULTADOS	64
5.1	HIDROLOGIA	64
5.1.1	Vazões históricas	64
5.1.2	Estimativa de vazões nos pontos de monitoramento	70
5.1.2.1	<i>Cálculo da área das bacias</i>	70
5.1.2.2	<i>Estimativa de vazões nos pontos de qualidade da água</i>	72

5.2	QUALIDADE DA ÁGUA.....	73
5.2.1	Análise de Consistência dos dados de qualidade da água.....	73
5.2.2	Estatística Descritiva	84
5.2.2.1	<i>Programa de Monitoramento da Qualidade da Água</i>	<i>84</i>
5.2.2.2	<i>Programa de Produtividade Pesqueira.....</i>	<i>87</i>
5.3	ANÁLISE DAS CARGAS NO RESERVATÓRIO	89
5.4	ANÁLISE EXPLORATÓRIA MULTIVARIADA.....	94
5.4.1	Correlação	94
5.4.2	PCA.....	96
5.4.3	Agrupamento.....	99
5.5	HIPÓTESES A RESPEITO DA QUALIDADE DA ÁGUA	104
5.5.1	Alterações na qualidade da água em função da localização do Ponto de Amostragem	104
5.5.2	Alterações na qualidade da água no interior do reservatório	106
5.5.3	Alterações na qualidade da água em função do período hidrológico..	108
5.5.4	Alterações na qualidade da água em função da implantação da Barragem	111
6	CONCLUSÃO	115
	REFERÊNCIAS.....	117
	APÊNDICE A - Gráficos exploratórios das variáveis de qualidade da água	124
	APÊNDICE B - Distribuição das variáveis após transformação segundo Box-Cox.....	129

1 INTRODUÇÃO

Grande parte do crescimento da demanda global de água (estimada em 1% ao ano) vem ocorrendo em países em desenvolvimento e é ocasionada pelo aumento da população, a mudança de padrões de consumo e o desenvolvimento econômico (UN-WATER, 2018). O crescimento da demanda vem acompanhado da deterioração da qualidade da água constatada em praticamente todo curso d'água na Ásia, África e América Latina desde 1990 (UN-WATER, 2018). Os rios são fontes de água, alimento, transporte e influenciam de forma direta a ocupação do solo no seu entorno.

A bacia hidrográfica do rio Uruguai tem grande importância para a região Sul do Brasil, Norte da Argentina e Ocidental do Uruguai devido às atividades agroindustriais desenvolvidas e pelo seu potencial hidrelétrico (ALMEIDA, 2016) . A região observou durante a segunda metade do século XX grande alteração no uso do solo (SAURRAL; BARROS; LETTENMAIER, 2008) . Desde a década de 70, a região vem sendo objeto de interesse de aproveitamento de energia hidráulica para geração elétrica. No início dos anos 2000 os projetos de hidrelétricas de Campos Novos, Machadinho, Itá, Garibaldi, Barra Grande e Foz do Chapecó, além de Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs) nos tributários, foram efetivamente implantadas (DAL MAGRO; RENK; FRANCO, 2015) .

Para entender a situação dos recursos hídricos, as mudanças ocorridas no tempo e no espaço, a interação entre variáveis físicas e ambientais, o monitoramento da qualidade da água superficial é de extrema importância (CALAZANS; PINTO; COSTA; PERINI; OLIVEIRA, 2018) .

Estudos para avaliação da qualidade da água de uma bacia hidrográfica em geral incluem a análise de uma série de constituintes (variáveis químicas, físicas e biológicas), por um período de tempo significativo e em diversas localidades (OLSEN; CHAPPELL; LOFTIS, 2012), o que gera uma complexa e extensa quantidade de dados onde os resultados não são facilmente interpretados.

A implantação de usinas hidrelétricas tem como característica afetar as vazões naturais nos cursos d'água. Por outro lado, a vazão de um rio pode influenciar os constituintes e concentrações presentes na água. Karf et al (2017)

demonstrou que o aumento da vazão é a causa predominante de diluição de poluentes no rio Passo Fundo. Melo et al (2002), avaliando os impactos sanitários e ambientais causados pelo lançamento de esgoto doméstico no rio Manhuaçu – Minas Gerais, detectou que nos meses de menor vazão, os parâmetros de qualidade da água analisados, assumiram os piores valores. Considerando a influência da vazão na qualidade da água, e a existência de barramentos ao longo do rio Uruguai, a caracterização do regime hídrico torna-se relevante.

Quanto à qualidade da água, a estatística é uma ferramenta essencial para que o dado gerado no programa de monitoramento possa ser convertido em informação que sirva à gestão ambiental do corpo hídrico. Ocorre que os dados de qualidade de água apresentam características próprias, que demandam ferramentas estatísticas adaptadas à essa realidade. De acordo com LiyaFu e You-GanWang (2012), os dados de qualidade da água em geral possuem: distribuição não-normal, presença de outliers, valores abaixo do limite de detecção, dados vazios e dependência serial. Essas características, aliadas à fatores de ordem humana podem comprometer a integridade dos dados gerados nos programas de monitoramento e recomendam que uma análise voltada à consistência de dados seja realizada, antes da aplicação das ferramentas estatísticas para a avaliação da qualidade da água.

Os reservatórios são ambientes suscetíveis à eutrofização e esse efeito tem relação, entre outros fatores, com a carga de nutrientes que chegam a ele. De acordo com Von Sperling, M. (2007), dentre os problemas ocasionados pela eutrofização, destacam-se o aumento dos custos de tratamento para produção de água potável, perda do valor estético de lagos, represas e rios, impedimento à navegação e recreação, bem como a redução do valor turístico. No caso de reservatórios é importante avaliar as fontes de nutrientes e como eles se comportam no trecho do rio transformado em reservatório.

As técnicas de estatística multivariada têm sido usadas na análise e interpretação de dados de qualidade da água (BILGIN, 2015; MEDEIROS et al., 2017; JUNG et al., 2016; KORKMAZ; GOKSULUK; ZARARSIZ, 2014; LI et al., 2015) . Essas técnicas permitem condensar a informação contida em diversas variáveis em um conjunto menor de novas dimensões compostas com uma perda mínima de informação. De forma alternativa, permitem que as amostras sejam reunidas em grupos de acordo com sua similaridade com técnicas como a análise de

agrupamento. Esses métodos podem permitir a avaliação de padrões espaciais e temporais na qualidade da água. Além disso, podem ajudar a avaliar possíveis impactos decorrentes da implantação da usina hidrelétrica.

Alguns dos cursos d'água tratados nesta dissertação foram previamente estudados (DAL MAGRO *et al.*, 2015; TERNUS, 2007; BOTTIN *et al.* 2007; CASTAMAN, 2014; ALMEIDA, CHIOSSI; ALMEIDA, 2017), contudo até o momento não há pesquisa na área que contenha informações com a amplitude geográfica e temporal que permita descrever o estado atual da qualidade da água nessa região importante da bacia do Uruguai. Assim sendo, o presente estudo tem como objetivo avaliar os impactos antrópicos causados na água no trecho do rio Uruguai afetado pela implantação da Usina Hidrelétrica Foz do Chapecó.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é avaliar o impacto antrópico na água superficial na área influenciada pela implantação da Usina Hidrelétrica de Foz do Chapecó.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar o regime hídrico em relação à vazão e sazonalidade no trecho do Uruguai e tributários influenciados pelo empreendimento;
- Avaliar consistência dos dados do programa de monitoramento de qualidade da água do empreendimento;
- Dimensionar as cargas de indicadores de eutrofização a que o reservatório está sujeito;
- Avaliar as variáveis de qualidade da água simultaneamente para verificar a existência de inter-relações e fatores de influência.
- Avaliar alterações na qualidade da água em função dos períodos de sazonalidade da vazão, da localização dos pontos monitoramento e da alteração do regime hídrico do trecho do rio Uruguai.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo teve por finalidade dar base a elaboração do trabalho, fazendo uso da fundamentação teórica pesquisada e apresentada nas referências utilizadas. Nesse caso foram abordadas referências a respeito de hidrologia e qualidade da água, além de um levantamento de trabalhos realizados na região de interesse. Para tanto, o capítulo está organizado em três subseções. Na subseção 3.1, Reservatórios, são apresentados os pormenores relacionados às características desse ambiente. Na subseção 3.2, Qualidade da água de um corpo hídrico, são descritos os dados de qualidade da água bem como a análise estatística. E, por fim, na subseção 3.3, Estudos realizados na região, são descritos os aspectos relacionados a água da região objeto de interesse deste trabalho.

3.1 RESERVATÓRIOS

Os reservatórios são ecossistemas aquáticos de extrema importância estratégica, uma vez que são utilizados para diversos fins e interferem com a qualidade de água, os mecanismos de funcionamento e a sucessão das comunidades aquáticas nos rios e bacias hidrográficas (TUNDISI; TUNDISI, 2008).

A condição dos ambientes aquáticos depende de vários fatores, que vão da qualidade de suas águas a aspectos físicos como a hidrologia, suas dimensões, a climatologia, as bacias de drenagem, dentre outros (BARTRAM; BALLANCE, 1996).

A extensiva construção de barragens pode se configurar numa ameaça a variabilidade sazonal do fluxo dos rios, alterando sua dinâmica natural. E razão disso, os barramentos têm potencial para reduzir diferenças regionais naturais e impor uma homogeneidade no ambiente (POFF et al., 2007).

De acordo com Tundisi e Tundisi (2008), a distribuição e reprodução de organismos, nos ciclos biogeoquímicos e na circulação horizontal são influenciados pelos reservatórios, especialmente os que estão em cachoeiras (como é o caso do rio Uruguai), produzindo novos padrões hidrodinâmicos químicos e biológicos.

Como a carga de contaminantes diluídos na água que chega ao reservatório é um produto da vazão e das concentrações de cada contribuinte, é necessário que os dados de vazão nos pontos de monitoramento de qualidade da água sejam mensurados.

O impacto imediato da implantação de barragens na hidrologia é a alteração das vazões naturais. O funcionamento do empreendimento hidrelétrico tem por princípio o acúmulo de água para geração de energia a medida da necessidade de consumo. Além disso, dependendo do projeto, os empreendimentos criam trechos de rio com restrição de vazões, que afetam as propriedades da água, fauna aquática e atividades socioeconômicas.

Para avaliar as alterações provocadas pela implantação de empreendimentos hidrelétricos é necessário que algumas variáveis hidrológicas sejam caracterizadas. Vazões médias, *percentis* (Q90, Q95, etc) podem ser calculadas a partir de registros fluviométricos.

As curvas de permanência relacionam a vazão do rio e a probabilidade relativa ao tempo em que a vazão é maior ou igual ao valor especificado. Segundo Naghettini e Pinto (2007), a curva de permanência apresenta grande importância na determinação dos volumes de regularização para a operação de reservatórios, bem como para avaliação de outorga de água.

Em relação à quantificação desses parâmetros que representam as diversas fases do ciclo hidrológico e sua variabilidade, tem como requisito a coleta sistemática de dados básicos que se desenvolvem ao longo do tempo ou do espaço. A precisão das respostas aos problemas de hidrologia aplicada será maior, quanto mais longos e precisos forem os registros de dados hidrológicos (NAGHETTINI; PINTO, 2007).

Contudo nem sempre há disponível registros para onde se deseja mensurar a vazão, assim é necessário que a regionalização das vazões seja realizada. A regionalização usa informações de estações fluviométricas existentes, com características semelhantes à bacia de interesse para que se possa estimar a vazão (SPERLING, 2014).

A sazonalidade é outro fator que pode ser afetado pela implantação de empreendimentos hidrelétricos. Dependendo do tipo e tamanho do reservatório, pulsos de cheia e seca podem ser amenizados. A avaliação da sazonalidade é um conceito complexo que incorpora uma série de componentes independentes (WALSH; LAWLER, 1981 apud LIVADA; ASIMAKOPOULOS, 2005).

3.2 QUALIDADE DA ÁGUA DE UM CORPO HÍDRICO

A qualidade da água de um rio reflete diversas influências, incluindo a formação do solo, geologia, condições atmosféricas e tipo de vegetação. Além dos processos naturais, a qualidade das águas é influenciada por atividades humanas, como o lançamento disperso ou pontual de despejos domésticos e industriais e de atividades agropecuárias (VON SPERLING, 2005), acrescidas das obras de engenharia, como a irrigação e a construção de barragens (STROBL; ROBILLARD, 2008).

Já ficou demonstrado que a água de qualidade é essencial para a sustentabilidade socioambiental (BARTRAM; BALANCE, 1996). Quanto ao uso, a água é necessária para preservação da fauna e flora, para dessedentação de animais e manutenção de ambientes. As atividades humanas dependem de forma extensiva da água, para o abastecimento doméstico, desenvolvimento de atividades industriais, geração de energia e irrigação destinada à agricultura.

A qualidade da água pode ser representada por diversas variáveis que traduzem as suas principais características físicas, químicas e biológicas (VON SPERLING, 2005). Em geral, o impacto e o comportamento das diferentes variáveis no ambiente são complexas e envolvem processos como adsorção, diluição, reações redox e ácido/base entre outros. O Quadro 1, relaciona os principais processos de transformação da qualidade da água de acordo com suas características.

Aqui cabe uma observação a respeito de conceitos. Boa parte da literatura a respeito da qualidade da água se refere às variáveis medidas (como compostos físicos, químicos ou biológicos) como parâmetros. Na estatística o termo parâmetro é usado como forma de descrever uma amostra ou população (como média e desvio padrão). Para que não haja ambiguidade, neste trabalho o termo parâmetro será usado no sentido de seu entendimento estatístico.

Quadro 1 - Processos naturais que afetam a qualidade da água.

Tipo de Processo	Principais Processos	Tipo de corpo d'água
Hidrológico	Diluição Evapotranspiração Percolação e lixiviação Suspensão	Todos Superficiais Subterrâneas Superficiais
Físico	Troca de gases com a atmosfera Volatilização Adsorção Troca de calor Difusão	Principalmente em rios, lagos e reservatórios. Principalmente em rios, lagos e reservatórios. Todos Principalmente em rios, lagos e reservatórios. Lagos, reservatórios e águas subterrâneas
Químico	Fotodegradação Reações ácido/base Reações redox Dissolução de partículas Precipitação de minerais Troca iônica	Superficiais Todos Todos Todos Todos Subterrâneas
Biológico	Produção Primária Desenvolvimento microbiano Decomposição de matéria orgânica Bioacumulação Biomagnificação	Superficiais Todos Principalmente em rios, lagos e reservatórios. Principalmente em rios, lagos e reservatórios. Principalmente em rios, lagos e reservatórios.

Fonte: Adaptado de Bartram e Balance (1996).

A avaliação da qualidade da água de lagos, reservatórios e rios necessita ser realizada por meio de programas de monitoramento, para que o gerenciamento possa ser entendido, interpretado e usado como suporte de decisão. As variáveis que caracterizam a qualidade das águas sofrem grandes variações no tempo e no espaço, havendo a necessidade de um programa de monitoramento sistemático para estimar corretamente a situação do corpo d'água. Um programa de monitoramento é uma atividade de longa duração, com coletas e análises padronizadas da qualidade da água, amostradas em diversos locais, com objetivo

específico (BEHMEL; DAMOUR; LUDWIG; RODRIGUEZ, 2016). Há diversos motivos para a realização do monitoramento, e em algumas circunstâncias as informações coletadas com um propósito podem se sobrepor e serem aproveitadas para um objetivo distinto (BARTRAM; BALANCE, 1996).

Segundo Andrade et al. (2007), um programa de monitoramento inclui coletas frequentes nos mesmos pontos de amostragem e análise em laboratório de grande número de variáveis, resultando em matriz de grandes dimensões e complexa interpretação. Em virtude dessas características, os dados gerados dos programas de monitoramento necessitam tratamento estatístico apropriado para que as informações necessárias ao gerenciamento da bacia sejam obtidas.

A avaliação da qualidade da água se dá pela medição de indicadores ou variáveis. Essas variáveis expressam de alguma forma as características encontradas nas águas. O Quadro 2 relaciona as variáveis avaliadas no monitoramento, separados pelos diferentes aspectos.

Quadro 2 - Variáveis de qualidade da água com suas características e origens, separadas pelos aspectos físico, químico e biológico.

(continua)

Variável	Característica	Origens
Aspecto Físico		
Temperatura	Expressa a energia das moléculas no corpo d'água e exerce influência na velocidade das reações químicas e na solubilidade dos gases.	Afetada principalmente pela energia solar ou fontes antrópicas (despejos industriais e águas de resfriamento de máquinas).
Turbidez	É provocada por partículas em suspensão e detritos orgânicos. Expressa o grau de interferência à passagem da luz através do líquido. Em lagos e represas, a redução da velocidade do fluxo pode ocasionar a diminuição de seus valores.	A origem natural está ligada à formação do solo na região e à precipitação. A influência antrópica está ligada ao mau uso do solo, desmatamento das margens, práticas agrícolas inadequadas, atividades minerárias e o lançamento de esgotos domésticos e efluentes industriais.
Transparência	Avalia a profundidade da zona eufótica, que indica o nível de atividade fotossintética no corpo.	As alterações na transparência têm a mesma origem da turbidez.
Sólidos Totais	São caracterizados como os resíduos remanescentes após a evaporação da água da amostra, em estufa, em uma dada temperatura. O resíduo seria o correspondente ao conteúdo de matéria em suspensão e dissolvida na água.	São afetados, de forma natural, pelos processos erosivos, organismos e detritos orgânicos, ou pela influência do homem por meio de lançamento de lixo e efluentes (domésticos e industriais), além da mineração.
Condutividade Elétrica	É a capacidade de transmitir a corrente elétrica em função da presença de substâncias dissolvidas, que se dissociam em ânions e cátions. Águas naturais apresentam teores de condutividade na faixa de 10 a 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$, e ambientes poluídos por esgotos domésticos ou industriais os valores podem chegar a 1.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.	Sofre influência da temperatura, e sais dissolvidos de origem natural ou antrópica.
Variável	Característica	Origens
Aspecto Químico		
Alcalinidade	Indica a quantidade de íons na água que reagem para neutralizar os íons hidrogênio, ou seja, é a capacidade dessa água em neutralizar ácidos. As águas naturais apresentam valores médios de alcalinidade na faixa de 30 a 500 mg/L de CaCO_3 (FUNASA, 2014).	Altos valores de alcalinidade estão associados a processos de decomposição da matéria orgânica e à alta taxa respiratória de micro-organismos.

Quadro 2 - Variáveis de qualidade da água com suas características e origens, separadas pelos aspectos físico, químico e biológico.

(continuação)

Variável	Característica	Origens
Aspecto Químico		
Cádmio	Normalmente presente em concentrações menores do que 1 µg/L nas águas não impactadas com lançamentos antrópicos. Quando presente, em maiores concentrações esse metal pode provocar doenças e acumular no ambiente aquático.	Inserido no ambiente por efluentes industriais, galvanoplastias, pigmentos, soldas, equipamentos eletrônicos, lubrificantes e acessórios fotográficos, bem como por poluição difusa causada por fertilizantes e poluição do ar local.
Cloretos	O íon cloreto está presente em todas as águas naturais, mas ocorre em maior concentração em águas subterrâneas e em abundância nas águas oceânicas. É indicador de lançamento de esgotos sanitários em corpos d'água superficiais. Apesar de não possuir efeito tóxico para o homem, podem influenciar nas características dos ecossistemas aquáticos naturais, por provocar alterações na pressão osmótica em células de microrganismos.	A concentração de cloretos é resultante da dissolução de minerais ou de sais e da intrusão de águas salinas no continente ou de lançamento de efluentes de esgoto sanitário.
DBO ₅	Medida indireta que avalia a quantidade de oxigênio necessário para oxidar a matéria orgânica por decomposição microbiana aeróbia.	O aumento da DBO em um corpo d'água está ligada ao despejo de material predominantemente orgânico, como esgotos domésticos, efluentes industriais e de criatórios de animais.
DQO	Medida indireta. Mensura a necessidade de oxigênio necessário para a estabilização da matéria orgânica ocorrida por processos químicos e microbianos aeróbicos. Por isso, os valores de DQO sempre devem ser maiores do que a DBO.	O aumento da DQO num corpo d'água deve-se principalmente a despejos de origem industrial.
Dureza	Indica a concentração de cátions multivalentes em solução na água. Na prática, dureza na água é a medida da sua capacidade de precipitar sabão.	A fonte de dureza nas águas é a sua passagem pelo solo (dissolução da rocha calcária pelo gás carbônico da água).

Quadro 2 - Variáveis de qualidade da água com suas características e origens, separadas pelos aspectos físico, químico e biológico.

(continuação)

Variável	Característica	Origens
Aspecto Químico		
Ferro Total	O elemento confere cor e sabor a água, contudo não é tóxico ao homem. Mais frequente em águas subterrâneas em função da dissolução do minério pelo gás carbônico.	As concentrações de ferro podem aumentar nas estações chuvosas devido ao carreamento de solos e a ocorrência de processos de erosão das margens. Além disso, pode estar presente em efluentes de algumas indústrias metalúrgicas.
Fosfato Total	Está amplamente distribuído no ambiente como ortofosfatos, fosfatos condensados e fosfatos organicamente ligados. É uma das formas como o fósforo ocorre em águas naturais e efluentes. É um importante nutriente para produtores primários. Também pode ser o fator limitante da produtividade primária de um curso d'água.	Fontes antrópicas incluem detergentes e fertilizantes, que são levados pelas chuvas até cursos d'água, Além disso, está presente em sedimentos de fundo e lodos biológicos, na forma de precipitados químicos inorgânicos.
Fósforo Total	O fósforo é um dos principais nutrientes para os processos biológicos (junto com o nitrogênio). Em grandes quantidades pode provocar eutrofização. De acordo com a FUNASA, em águas não poluídas, as concentrações de fósforo situam-se na faixa de 0,01 mg/L a 0,05 mg/L.	A origem natural do fósforo nas águas está relacionada à dissolução de rochas, carreamento do solo, decomposição de matéria orgânica e chuva. A origem antrópica está relacionada ao lançamento de esgotos, detergentes, fertilizantes e pesticidas.
Nitrato	É a forma oxidada de nitrogênio, encontrada em condições de aerobiose. Os nitratos são tóxicos em certas concentrações. É responsável pela metahemoglobinemia, doença infantil que pode ser letal.	Os nitratos podem ser encontrados no meio aquático em virtude da fixação do nitrogênio atmosférico. Além disso, os esgotos domésticos e insumos agrícolas podem aumentar as concentrações do composto.
Nitrito	É a forma intermediária do nitrogênio no processo de oxidação. Apresenta forte instabilidade no meio aquoso.	Indica a existência de processos biológicos ativos relacionados à poluição orgânica.

Quadro 2 - Variáveis de qualidade da água com suas características e origens, separadas pelos aspectos físico, químico e biológico.

(continuação)

Variável	Característica	Origens
Aspecto Químico		
Nitrogênio Total	É a soma das concentrações de nitrogênio orgânico (nitrogenados orgânicos e biomassa), amoniacal, nitratos e nitrito. É um dos mais importantes nutrientes para o crescimento de algas e macrófitas.	O Nitrogênio está disponível em abundância na atmosfera e pode ser incorporado a água por meio de fixação química ou biofixação. As atividades antrópicas podem ser fonte de nitrogênio quando do lançamento de esgotos, efluentes industriais, escoamento pluvial por áreas de agricultura e nas cidades.
Óleos e Graxas	Substâncias orgânicas de origem mineral, vegetal ou animal. Raramente encontrados em águas naturais.	Originárias de despejos e resíduos industriais, esgotos domésticos, efluentes de oficinas mecânicas, postos de gasolina, estradas e vias públicas.
Oxigênio Dissolvido	O teor de oxigênio dissolvido em meio aquoso está associado aos processos físicos, químicos e biológicos. Concentrações mínimas de oxigênio dissolvido de 2 mg/L a 5 mg/L são necessários à manutenção da vida aquática aeróbica. Em corpos d'água eutrofizados, o crescimento excessivo de algas pode alterar as concentrações de oxigênio dissolvido mascarando a poluição.	Aeração e troca de gases são fontes naturais de oxigênio na água. Outra fonte importante de oxigênio nas águas é a fotossíntese de algas. Baixos valores de OD estão ligados ao lançamento de matéria orgânica e sua decomposição por microrganismos.
pH	O potencial hidrogeniônico representa medição da concentração do íon hidrogênio no meio líquido. Avalia a intensidade das condições ácidas ou alcalinas da água. Exerce influência direta devido a seus efeitos sobre a fisiologia das diversas espécies. Influenciam indiretamente na precipitação de elementos químicos tóxicos como metais pesados e sobre as solubilidades de nutrientes.	As alterações podem ter origem natural na dissolução de rochas ou fotossíntese. As alterações de origem antrópica estão ligadas a despejos domésticos e industriais.

Quadro 2 - Variáveis de qualidade da água com suas características e origens, separadas pelos aspectos físico, químico e biológico.

(conclusão)

Variável	Característica	Origens
Aspecto Biológico		
Clorofila-a	É considerada a principal indicadora de estado trófico dos ambientes aquáticos. A clorofila é um dos pigmentos responsáveis pelo processo fotossintético. A clorofila tipo “a” é a mais frequente das clorofilas e representa, aproximadamente, de 1 a 2% do peso seco do material orgânico em todas as algas planctônicas.	Tem origem em organismos fotossintetizantes.
Coliformes Totais	As bactérias do grupo coliforme estão presentes no intestino humano e de animais de sangue quente e são eliminadas nas fezes em números elevados. Pode ocorrer naturalmente no solo, na água e em plantas. Apresentam capacidade de se multiplicar na água. Em razão de sua existência em ambientes naturais sem ação humana, coliformes totais têm valor sanitário limitado.	Decomposição de matéria orgânica de origem antrópica ou não.
Coliformes Fecais	Compreende o gênero <i>Escherichia</i> e, em menor extensão, espécies de <i>Klebsiella</i> , <i>Citrobacter</i> e <i>Enterobacter</i> . Apesar da denominação, acaba também por incluir bactérias de origem não exclusivamente fecal, embora em proporção bem menor que o grupo dos coliformes totais.	Sua origem está ligada ao despejo de efluentes sanitários, e industriais (laticínios, curtumes, abatedouros e frigoríficos).

Fontes: Cetesb (2009); Freitas (2017); Arruda (2014); Funasa (2014).

3.2.1 Dados de qualidade da água

Os dados de qualidade da água em geral possuem algumas características peculiares, como: distribuição não-normal, presença de *outliers*, valores abaixo do limite de detecção, dados vazios e dependência serial (LIYAFU; YOU-GANWANG, 2012). É necessário, portanto, que a metodologia estatística apropriada seja utilizada para que as conclusões obtidas sejam válidas.

3.2.1.1 *Dados Perdidos*

Um dos problemas mais comuns na análise de dados ambientais são os valores perdidos ou em branco. Eles podem ocorrer por falta de material para realização de testes, quantidade de amostra coletada insuficiente, valores perdidos em alguma parte do processamento ou pela ocorrência de um evento em campo. Essas situações levam a perda de dados ao acaso (REIMANN; FILZMOSE; GARRETT; DUTTER, 2015).

O impacto do dado perdido pode ser bastante importante, em especial quando se pretende aplicar técnicas de estatística multivariada. Alguns dos métodos exigem que os casos sejam completos, o que podem eliminar tantas observações que pode tornar uma amostra inadequada para técnica escolhida. Além do mais, caso o processo de perda de dados seja não aleatório, isso pode incluir um viés nos resultados obtidos.

De acordo com HAIR et al. (2009), o pesquisador precisa questionar duas coisas para identificar padrões nos dados perdidos: Se os dados perdidos estão distribuídos ao acaso pelas observações, ou são padrões distintos identificáveis e qual é a frequência desses dados. Se forem encontrados padrões distintos e a extensão dos dados perdidos for suficiente para garantir uma ação, então se considera que algum processo de dados perdidos está em operação.

Substituir os dados faltantes completamente ao acaso, pela média da coluna, zero e valor esperado tem se mostrado inapropriado porque a estrutura de correlação dos dados é distorcida (STANIMIROVA, 2013).

Um dos tratamentos para viabilizar a análise estatística no caso de ocorrência de dados em branco é a eliminação de variáveis. Isso deve ser realizado com muito cuidado, garantindo que a eliminação vai provocar a diminuição substancial dos dados perdidos. Quando possível, é importante que a variável eliminada possua alguma outra com correlação alta para representar a intenção da variável original (HAIR. et al., 2009).

3.2.1.2 *Dados Censurados*

Em qualquer medição de aspectos químicos, físicos ou biológicos no ambiente há um grau de incerteza. As manipulações necessárias à realização da

análise, como diluição, secagem, extração introduzem uma variação que deve ser levada em consideração. O limite de detecção (LD) de cada elemento pode variar de acordo com o laboratório, com o método, com as limitações dos instrumentos entre outros fatores. Os valores abaixo do limite de detecção na análise de qualidade da água são identificados como dados censurados à esquerda, e deve ser compreendido como uma observação que não foi quantificada, mas que se tem conhecimento de que o valor está acima de determinado limite. Importante destacar que, em campanhas de monitoramento de longa duração, existe a possibilidade desses limites serem alterados à medida que os equipamentos e técnicas evoluam ou que os resultados sejam provenientes de diversos laboratórios (LIYAFU; YOU-GANWANG, 2012). Nos laudos de análise, os valores abaixo do limite de detecção são apresentados em geral como “<LD”, onde LD representa o limite de detecção do método.

Embora seja importante que a informação dos limites de detecção esteja presente nos laudos, esses valores criam uma dificuldade adicional na análise estatística dos dados. Além disso, como médias e desvios padrão não podem ser calculados com esse tipo de dado, os testes que utilizam o Teorema do Limite Central não podem ser aplicados (REIMANN et al., 2015). Da mesma forma, dados censurados limitam, ou interferem na aplicação de técnicas de estatística multivariada.

Há algumas alternativas para o manuseio de dados censurados. A eliminação do dado, de toda a variável ou do caso (amostra) em que ele se encontra é uma delas. Outra abordagem é a substituição dos valores censurados por um valor constante igual ou menor do que o limite de detecção. Além dessas abordagens, existem métodos paramétricos e não-paramétricos que podem ser utilizados para obtenção da estatística descritiva de dados censurados.

Sempre importante notar que as escolhas em relação ao manuseio do valor censurado têm consequência, como a alteração da distribuição quando se elimina o dado. Outra situação bastante frequente é a substituição dos valores censurados por um valor constante abaixo ou igual ao do limite de detecção (em geral uma fração). De acordo com Helsel (1990), a substituição dos valores é utilizada de maneira vasta, contudo carece de base teórica. Por outro lado, pesquisas com uso de dados simulados têm avaliado que as substituições podem ser realizadas para

alguns testes estatísticos quando o nível de censura da variável é menor do que 25% (ANTWEILER, 2015; STANIMIROVA, 2013).

Para a extração de parâmetros de estatística descritiva em variáveis com dados censurados, podem ser ainda utilizadas as seguintes técnicas:

- Estimador da Máxima Verossimilhança (EMV): o método assume que os dados acima e abaixo do limite assumem a distribuição designada (normal ou lognormal) e os parâmetros são calculados para se adaptar da melhor forma a ela. O método tem sensibilidade a *outliers* e pode não funcionar adequadamente com pequenos conjuntos de dados, uma vez que neles não há informação suficiente para saber se há aderência à distribuição de frequência escolhida (HELSEL, 2011).
- Regressão de Ordem Estatística (ou *Regression on Order Statistics* – ROS) – Neste método os pontos censurados e não censurados são plotados no gráfico tipo *Weibull*, e um modelo linear é ajustado para estimar os valores com o método da máxima verossimilhança. A curva ajustada é utilizada para extrapolar os dados abaixo do limite de detecção (HELSEL, 1990). Esses valores são considerados para o cálculo das estatísticas da distribuição, de forma coletiva. É importante ressaltar que o valor das amostras censuradas não deve ser utilizado individualmente em testes não paramétricos, uma vez que criam um ordenamento artificial das amostras (CHRISTOFARO; LEÃO, 2014). De acordo com Shumway, Azari e Kayhanian (2002), o ROS tem se mostrado uma das abordagens mais eficientes para estimativa de estatísticas em dados com múltiplos limites de detecção.
- Kaplan-Meier (KM) – É um método não-paramétrico, constituindo uma alternativa que não depende de uma determinada distribuição para ser utilizada para preenchimento dos dados censurados. Apesar de poder se adaptar a dados com diversos limites de detecção, ainda não são vastamente utilizados com dados ambientais (HELSEL, 2011). Originalmente o método foi desenvolvido em análises de sobrevivência, para uso com dados censurados à direita. Como adaptação para uso em dados ambientais, em geral com dados censurados à esquerda, é necessário inverter a ordem dos dados. Isso é realizado subtraindo de todos os dados um valor arbitrário um pouco maior que o máximo encontrado na variável, o que permite criar uma função de distribuição empírica, e com isso estimar os parâmetros estatísticos da

variável. O método é pouco sensível a *outliers* (frequente em dados ambientais) e funciona bem com amostras pequenas (HELSEL, 2011).

3.2.1.3 Outliers

São valores extremos, muito diferentes do que os encontrados na série de dados. A ocorrência de dados extremos faz com que a distribuição dos dados ganhe assimetria, e dificultem a aplicação de determinados testes estatísticos. Eles podem indicar algum erro nas etapas de obtenção do dado, contudo isso nem sempre é o caso.

De acordo com Helsel e Hirsch (2002), *outliers* podem ter três principais causas:

1. Erro de medição e armazenamento do dado;
2. Uma observação que faz parte de uma população diferente da mensurada nas demais amostras, como uma inundação causada por quebra de barragem;
3. Um evento raro da mesma população com acentuada assimetria.

A identificação de *outliers* pode ser realizada por métodos gráficos ou por testes de hipótese, mas, nesse caso, dependem do nível de significância adotado.

A detecção de *outliers* pode ser uma ferramenta muito útil na identificação de possíveis erros. Por outro lado, é importante que esses dados não sejam removidos sem uma boa análise crítica (VIANA, 2014). Esses valores devem ser verificados para identificação de um equívoco na digitação ou na transferência das informações, contudo isso nem sempre é possível e, quando possível é extremamente dispendioso. Se o erro não for detectado o valor não deve ser descartado apenas pelo fato de parecerem incomuns (HELSEL; HIRSCH, 2002).

3.2.2 Análise estatística dos dados de qualidade da água

Como já mencionado, o monitoramento de qualidade da água gera uma quantidade de dados complexa, que envolve diversas campanhas, em locais diferentes e medindo diversos parâmetros. Essa complexidade permite duas abordagens: a estatística particionada em diversos aspectos (locais, tempo ou variáveis) ou a estatística multivariada unindo algum desses aspectos. Outro fator que pode influenciar na escolha do tipo de estatística a ser utilizada é a forma como

os dados se distribuem no espaço amostral. Alguns testes estatísticos possuem restrições de uso que pressupõem determinadas configurações dos dados.

Assim, a escolha do tipo de método a ser aplicado vai depender do objetivo e dos dados que serão submetidos ao teste. Abaixo são listados métodos comumente utilizados para avaliação de qualidade da água.

3.2.2.1 Comparação entre dois grupos

Esse tipo de teste serve para comparar, por exemplo, se determinada variável tem comportamento diferente de acordo com sua localização em relação a barragem. Um conjunto de dados representa a água a montante e outro a jusante.

Para dados com distribuição normal, a alternativa é a utilização do Teste-t de *Student*. Quando conjunto de dados não atende o pressuposto de normalidade do Teste-t, a alternativa não paramétrica é o teste U de *Mann-Whitney* (também identificado como *rank sum test* ou *Wilcoxon-Mann-Whitney*) (HELSEL; HIRSCH, 2002).

Rocha, Silva e Freitas (2016) utilizaram o Teste-t na represa de São Pedro, Juiz de Fora, Minas Gerais para verificar a diferença nas variáveis de qualidade da água nas épocas secas e de chuva. Depois de testar a normalidade dos dados pelo teste de *Kolmogorov-Smirnov*, o estudo constatou que as variáveis turbidez, ferro, dureza, oxigênio consumido, condutividade e DBO possuíam variação significativa entre as estações climáticas.

Pimenta et al. (2012) estudaram a qualidade da água do rio Antas na área de influência da usina Hidrelétrica de Monte Carlo. O Teste-t foi aplicado a 4 pontos localizados nas proximidades da barragem, trecho de vazão reduzida e retorno da água turbinada. O teste aplicado mostrou que algumas das variáveis apresentaram diferença nos pontos analisados, contudo o estudo concluiu que a qualidade da água não foi afetada pela implantação da usina.

Viana (2014) utilizou o teste de *Mann-Whitney* para verificar diferenças significativas nas variáveis na qualidade da água em diferentes profundidades do reservatório de Nova Ponte. O Teste U de *Mann-Whitney* também foi utilizado para verificar diferenças na qualidade da água na estação seca a chuvosa.

Calazans et al. (2018) usaram o teste de *Mann-Whitney* (ou *Kruskal-Wallis*, dependendo do número de grupos) para comparar às variáveis formadas na análise

de agrupamento na rede de monitoramento na bacia hidrográfica do rio Paraopebas, Minas Gerais.

Como se observa, as técnicas estatísticas para comparação entre dois grupos têm sido usadas para avaliação de qualidade da água e podem ser aplicadas para o estudo de caso da bacia hidrográfica do rio Uruguai.

3.2.2.2 Comparação entre mais de dois grupos

No caso em que é necessário comparar mais de 2 conjuntos de dados, o teste de Análise de Variância – ANOVA é a alternativa paramétrica. Para que a ANOVA tenha validade, é necessário que a variável dependente seja normalmente distribuída, que os grupos sejam independentes em suas respostas sobre a variável dependente e que as variâncias sejam iguais para todos os grupos de tratamento (HAIR et al., 2009). Quando os pressupostos de validade da ANOVA não são atendidos, é possível aplicar o teste não-paramétrico *Kruskal-Wallis* (KW) que é um teste de *Mann-Whitney* estendido. Por princípio, esses testes têm como hipótese nula a inexistência de diferença entre os tratamentos (ou grupos).

Caso o teste de comparação múltipla indique a existência de diferença entre os tratamentos, devem ser utilizados métodos como o de *Dunn* (com a correção de Bonferroni) para avaliar quais os grupos são diferentes de forma significativa (DALZUCHIO et al., 2018; STETS et al., 2018).

Como previamente mencionado, Calazans et al. (2018) usaram os testes de *Mann-Whitney* e *Kruskal-Wallis* (conforme o número de grupos) para comparar as variáveis formadas na análise de agrupamento na rede de monitoramento na bacia hidrográfica do rio Paraopeba, Minas Gerais.

Bilgin (2015) usou a ANOVA, combinada com análise de componentes principais e análise fatorial, para avaliar 24 variáveis de qualidade da água em quatro pontos na bacia do rio Coruh, Turquia. No estudo foi possível constatar diferença entre a água a montante e jusante do lançamento de efluentes de uma empresa de cobre.

Hou et al. (2016) usaram a ANOVA para verificar a diferença nas variáveis de qualidade da água de cinco reservatórios no rio Amarelo e nas montanhas, na China. O estudo constatou que os coliformes fecais, mercúrio, fluoreto, cloreto, sulfato e selênio apresentavam diferenças significativas entre as localidades.

Trindade (2013) utilizou o teste de *Kruskal-Wallis*, seguidos pelos testes de comparações múltiplas e análise gráfica, para fazer estudo inferencial a respeito da qualidade da água nas sub-bacias do rio São Francisco.

3.2.2.3 *Estatística Multivariada*

Nos últimos anos, as técnicas de estatística multivariada vêm se popularizando em virtude da ampliação de capacidade tecnológica. Com isso, a complexidade do ambiente pode ser interpretada de maneira mais adequada.

As técnicas de estatística multivariada podem ser classificadas com base em três julgamentos (HAIR et al., 2009):

- As variáveis podem ser tratadas como dependentes e independentes com base na teoria?
- Quantas variáveis são tratadas como dependentes em uma única análise?
- Como as variáveis são medidas?

Com base nesses critérios e os objetivos da análise é possível selecionar a técnica a ser utilizada.

O método de estatística multivariada mais utilizado em estudos ambientais é a análise de componentes principais, que usa a estrutura de correlação entre as diversas variáveis para produzir novas variáveis em número menor, mas que mantém a maior parte da informação do conjunto de dados originais (OLSEN et al., 2012). Outros métodos como a análise de agrupamento (*cluster*) ou a análise multivariada de fatores tem potencial para facilitar a interpretação da matriz complexa de dados formada pelo monitoramento da qualidade da água.

Diversos artigos recentes fizeram uso de métodos estatísticos multivariados para análise de qualidade da água. Calazans et al. (2018) avaliou a proposta de monitoramento da bacia do rio Paraopebas, com base num banco de dados de qualidade da água, utilizando métodos estatísticos multivariados.

Sotomayor, Hampel e Vasquez (2018) utilizaram métodos estatísticos de análise de agrupamento (*k-means*), combinados com algoritmo genético para avaliar uma base de dados de qualidade da água da bacia do rio Paute no Equador.

Diamantini et al. (2018) usaram a correlação de Spearman, análise de componentes principais e teste da *Mann-Kendall* para avaliar a influência do clima e uso do solo na qualidade da água de três bacias na Europa.

3.2.2.4 *Análise de Agrupamento (Cluster)*

A Análise de Agrupamento (*Cluster*) consiste em uma série de técnicas que tem por objetivo agregar casos com base nas suas características. Pode ser usado para revelar similaridades entre locais de amostragem (KOVÁCS; TANOS; KORPONA; SZÉKELY; GONDÁR, 2015).

As amostras com suas diversas variáveis são tratadas como pontos em um espaço n dimensional. As medidas de similaridade de dois elementos são feitas por medidas matemáticas que possibilitam calcular as distâncias entre esses pontos. A partir do cálculo da distância entre os pontos é possível começar a agrupá-los por meio das ligações.

Algumas das medidas mais comuns para avaliação da distância são: euclidiana, quadrado da distância, Manhattan e Mahalanobis. Para a formação de grupos é necessária uma estratégia para unir os pontos: Ligações Simples ou Vizinho mais próximo, Ligações Completas, Método das Médias das Distâncias, Método do Centróide e Método de Ward (FRANÇA, 2009).

No agrupamento hierárquico os métodos de distância euclidiana e o agrupamento de Ward foram usados por Godoy et al. (2018), Kazi et al. (2009) e Shrestha e Kazama (2007).

A separação de amostras em grupos homogêneos é uma ferramenta importante para a caracterização de sistemas hidrológicos (GULER, 2002). Técnicas não supervisionadas, como o K-means, têm a capacidade de facilitar a interpretação de matrizes complexas de dados de qualidade da água. O K-means e outras técnicas foram usadas por Sotomayor et al. (2018) para interpretar dados de qualidade da água na bacia do rio Paute, no sul do Equador.

3.2.2.5 *Análise Fatorial/Análise de Componentes Principais (PCA)*

Assim como a análise de agrupamento, a análise fatorial é considerada uma técnica onde as variáveis são interdependentes. Nessa técnica, as variáveis são avaliadas simultaneamente para encontrar uma estrutura subjacente a todo conjunto de variáveis. Análise fatorial inclui PCA e análise dos fatores comuns, é uma abordagem estatística que pode ser usada para avaliar interrelações entre um

grande número de variáveis e explicar essas variáveis em termos de suas dimensões inerentes comuns (HAIR et al., 2009).

A análise fatorial vem sendo empregada na área ambiental de forma vasta. Olsen, Chappell e Loftis (2012) fizeram uma revisão na literatura e aplicaram técnicas de PCA no rio Ilinois, localizado nos Estados Unidos.

Bilgin (2015) usou a ANOVA, combinada com análise de componentes principais e análise fatorial, para avaliar 24 variáveis de qualidade da água em quatro pontos na bacia do rio Coruh, Turquia. No estudo foi possível constatar diferença entre a água a montante e jusante do lançamento de efluentes de uma empresa de cobre.

Nathan, Saravanane e Sundararajan (2017) usaram agrupamento hierárquico, análise de componentes principais, análise fatorial e a análise multivariada de variância (Manova) para avaliar os mecanismos que influenciam a água subterrânea em Lawspet, Índia.

3.3 ESTUDOS REALIZADOS NA REGIÃO

A qualidade da água da região do Alto Uruguai, especialmente no trecho do rio entre as UHEs Itá e Foz do Chapecó e bacias hidrográficas tributárias, foi estudada previamente.

Dal Magro et al. (2015) elaborou estudo ao longo de 105 quilômetros de extensão, no rio Uruguai e tributários Irani, Monte Alegre, Passo Fundo, Lajeado Bonito, Chapecó, Lajeado São José e rio Barra Grande. Os dados foram obtidos em 15 campanhas, nos meses de junho de 2007 a 2010, setembro 2007, 2008 e 2010, outubro de 2009, dezembro de 2007 a 2010. As variáveis de qualidade da água analisadas foram temperatura da água, pH, Oxigênio Dissolvido, DBO, DQO, Condutividade Elétrica, Fósforo, Nitrito, Nitrito, Amônia, Nitrogênio Total, Óleos e Graxas, Sólidos Totais, Sólidos Totais Dissolvidos, Turbidez, Coliformes Totais e Termotolerantes, Alcalinidade e IQA (Índice de qualidade da água).

O estudo utilizou a análise de variância multivariada de dois fatores com permutações para avaliar os efeitos em relação ao local de amostragem e à estação climática. Foram realizadas análises de coordenadas principais para visualização da distribuição dos pontos de amostragem e das estações do ano.

Os autores constataram diferenças significativas da qualidade da água nos pontos de amostragem e estações climáticas. O estudo concluiu que os cursos d'água da região apresentavam boa qualidade no período anterior a implantação da usina hidrelétrica de Foz do Chapecó, com algumas exceções. Os dados obtidos do trabalho de Dal Magro et al. (2015) serão analisados com mais detalhes adiante no trabalho.

A qualidade da água dos tributários localizados no trecho do rio Uruguai a ser avaliado também foram objeto de trabalhos acadêmicos.

Ternus (2007) realizou pesquisa para avaliar a qualidade da água de nove afluentes pertencentes à bacia hidrográfica do Alto Uruguai, na região Oeste de Santa Catarina. As coletas de água foram feitas bimestralmente durante um ano, no período de março de 2005 a agosto de 2006, sendo analisadas as seguintes variáveis: profundidade, pH, condutividade elétrica, oxigênio dissolvido, temperatura da água, demanda química de oxigênio, alcalinidade total, amônia, nitrito, nitrato, fósforo e elementos-traço (cádmio, cobre, ferro, manganês, zinco e chumbo). As bacias estudadas foram as dos rios Irani, Xaxim, Taquaruçu, Lajeado São José, Lambedor, Lajeado Bonito, Palmitos, São Domingos e Iracema.

Os dados obtidos foram avaliados com os testes de análise de componentes principais e análise de variância. Nos resultados a autora relaciona supressão de vegetação ciliar com a entrada de poluente nos cursos d'água. Além disso, aponta mudanças nas características naturais dos rios Taquaruçu, Xaxim, Lajeado São José em função do lançamento de dejetos in natura e de poluição industrial.

Bottin et al. (2007) estudaram a microbacia hidrográfica do Lajeado Passo dos Índios, Município de Chapecó. As variáveis físicas e químicas da água (profundidade, transparência e temperatura da água, temperatura do ambiente, pH, alcalinidade total, turbidez, sólidos totais, condutividade elétrica, oxigênio dissolvido, DBO, DQO, nitrogênio amoniacal, nitrito e nitrato, fósforo total, coliformes totais e termotolerantes e o IQA) obtidas em coletadas bimestralmente no período de abril a dezembro de 2006. Foram também obtidos dados a respeito do teor de matéria orgânica no sedimento e a quantificação da área de vegetação marginal do curso d'água.

Para a análise dos dados o método de Análise de Componentes Principais foi utilizado. A preparação dos dados incluiu a transformação de parte das variáveis.

Além da PCA, a análise de variância entre os pontos de coleta e aplicação do teste de *Tukey* foram realizados.

Os resultados indicaram contaminação desde as nascentes de alguns dos rios da microbacia, e declínio da qualidade da água dos Rios Lajeado Passo dos Índios e Lajeado Palmital a partir da região urbana. Na PCA o Lajeado Passo dos Índios mostrou padrão distinto dos demais pontos. O IQA indicou que a maioria dos pontos com qualidade da água mediana. O uso inadequado do solo, despejo sistemático de efluentes urbanos e ausência de vegetação marginal foram indicados como os fatores que mais influenciaram no declínio da qualidade da água desta microbacia.

Castaman (2014) avaliou a qualidade da água dos mananciais nos bairros Boa Vista, Paraíso, São Pedro, Bom Pastor e Linha São Pedro A, pertencentes à bacia do Lajeado Passo dos Índios, que drena a parte leste do município de Chapecó. As variáveis: pH, Turbidez, Condutividade Elétrica, DBO, Temperatura, Nitrato, Fósforo Total, Sólidos Totais, Ferro Solúvel, Amônia, Coliformes Totais e *Escherichia coli* foram coletadas em oito pontos nos meses de setembro, outubro e novembro de 2014. Os resultados relacionaram a ocupação desordenada das áreas ribeirinhas com o aumento da poluição dos mananciais.

Almeida, Chiossi e Almeida (2017) avaliaram a qualidade da água e a composição das espécies florestais na mata ciliar do Rio Ariranha. Neste rio, que desagua no Uruguai no trecho do reservatório da UHE Foz do Chapecó, foram realizadas análises físico-químicas e biológicas para avaliar a qualidade da água e as variações encontradas entre os três pontos selecionados para o estudo. As coletas de água foram realizadas entre maio a outubro de 2011, com intervalo de 25 dias.

As variáveis foram avaliadas com a aplicação da análise de variância unifatorial, e quando detectadas diferenças nas médias, foram submetidas ao teste de *Tukey*.

As variáveis temperatura, pH, oxigênio dissolvido e nitrato, não apresentaram variações significativas nas médias para os pontos. Por outro lado, a análise de variância mostrou que os locais de amostra apresentaram diferenças significativas para coliformes fecais e totais, turbidez e fósforo total.

Ternus et al. (2011) avaliaram as características limnológicas de tributários do Alto Uruguai (Irani, Xaxim, Taquaruçu, Lajeado São José, Lamedor, Lajeado

Bonito, Palmitos, São Domingos e Iracema). As amostragens foram bimestrais de março de 2005 a agosto de 2006. Foram analisadas as variáveis profundidade, pH, condutividade elétrica, oxigênio dissolvido, temperatura da água, demanda química de oxigênio e fósforo. A análise dos dados foi realizada com o uso do PCA, com a transformação das variáveis previamente realizada.

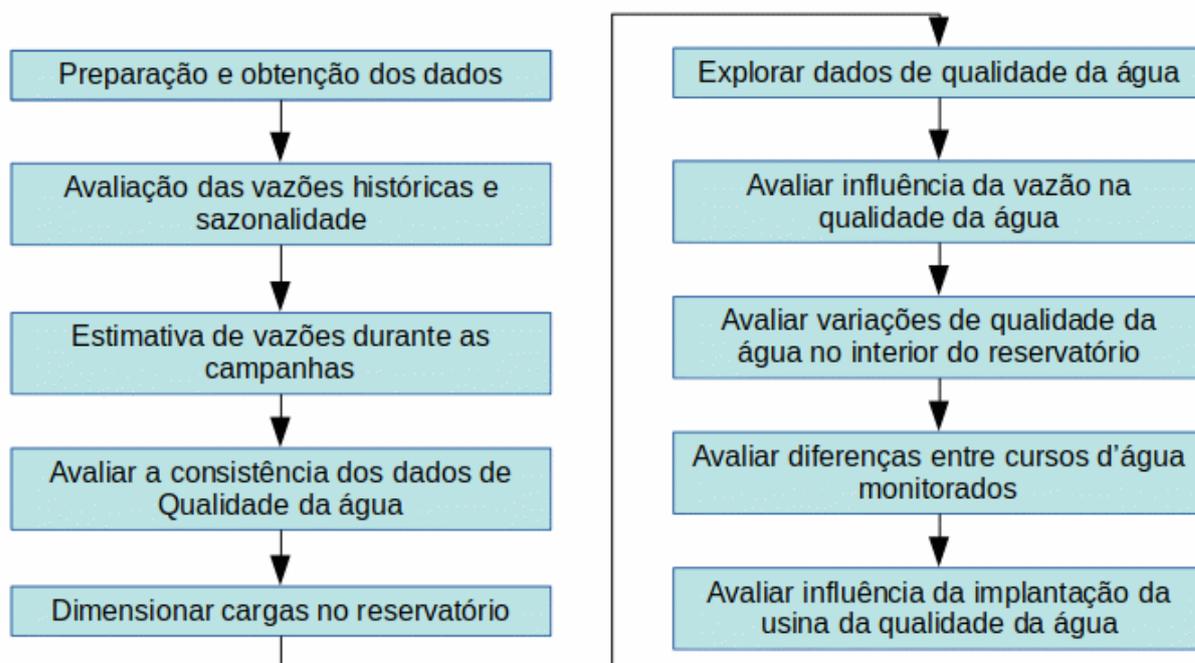
Os resultados indicaram que a maioria dos rios demonstra um aumento gradual da condutividade elétrica, da DQO, fósforo, alcalinidade, nitrito e nitrato. Contudo, em rios que atravessam a área urbana, são observados picos de entrada de material orgânico. Por fim, o estudo conclui que embora a região sofra a pressão de uma intensa atividade agrícola (agricultura e pecuária), os rios mais alterados em suas características originais foram aqueles que recebem influência da área urbana.

Avaliando os estudos realizados na região do Alto rio Uruguai é possível constatar que há uma lacuna em relação à análise de qualidade da água posterior a implantação da Usina Foz do Chapecó. Além disso, com base nos estudos já realizados, é possível inferir que o rio Uruguai possuía boa qualidade da água antes da implantação do aproveitamento hidrelétrico. Alguns tributários, como o rio Ariranha, os rios das bacias Passo dos Índios e Lajeado São José, apresentaram sinais de degradação da água em razão das atividades antrópicas (urbanização, atividades agrícolas e pecuárias).

4 METODOLOGIA

A metodologia do trabalho é composta pela apresentação da área de estudo, apresentação dos dados de hidrologia e de qualidade da água, além da descrição da análise estatística desses dados.

Figura 1 - Sequência metodológica da análise dos dados.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 1 mostra uma representação simplificada da sequência metodológica de análise estatística dos dados, que será detalhada na subseção 4.4 do trabalho.

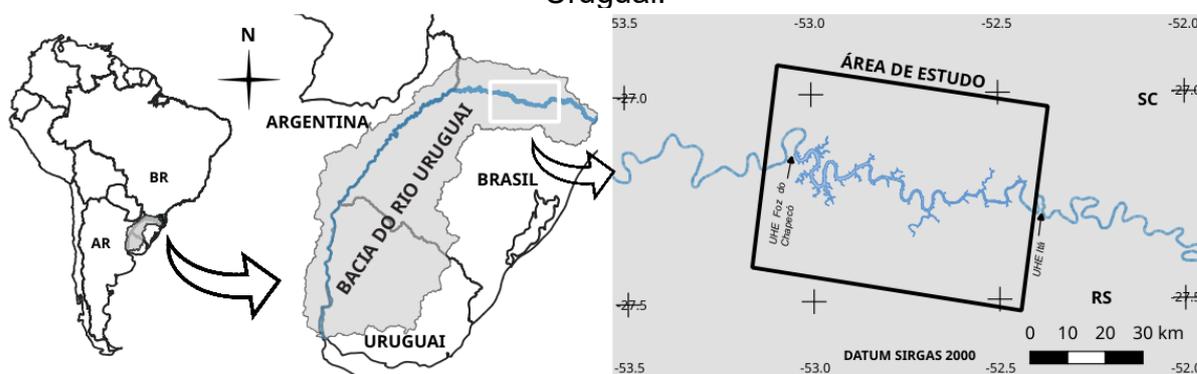
4.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA

A bacia do rio Uruguai se origina no extremo leste das bacias dos rios Pelotas e Canoas, na fronteira dos estados brasileiros de Santa Catarina e Rio Grande do Sul, seguindo no sentido Oeste em direção à divisa do Brasil com Argentina. Após sua junção com o rio Peperi-Guaçú escoar em direção a sudoeste nos limites de Brasil e Argentina e posteriormente na divisa de Uruguai e Argentina, para finalmente desembocar na foz do rio da Prata. As principais nascentes do rio

Uruguai encontram-se na Serra Geral, em cotas próximas a 2000 metros acima do nível do mar (DAL MAGRO et al., 2015).

O clima da região é temperado, com chuvas distribuídas ao longo de todo o ano. A região apresenta baixo nível de tratamento de esgotos. Nas áreas próximas aos rios Peperi-Guaçu, das Antas, Chapecó, Irani, Jacutinga, do Peixe e Canoas, o transporte, a diluição e a assimilação dos efluentes urbanos, rurais (suíno e aviculturas intensivas) e industriais (produção de celulose) causam degradação da qualidade das águas, impactando o abastecimento (BRASIL, 2015).

Figura 2 - Mapa de localização da área de estudo da qualidade da água no alto Uruguai.



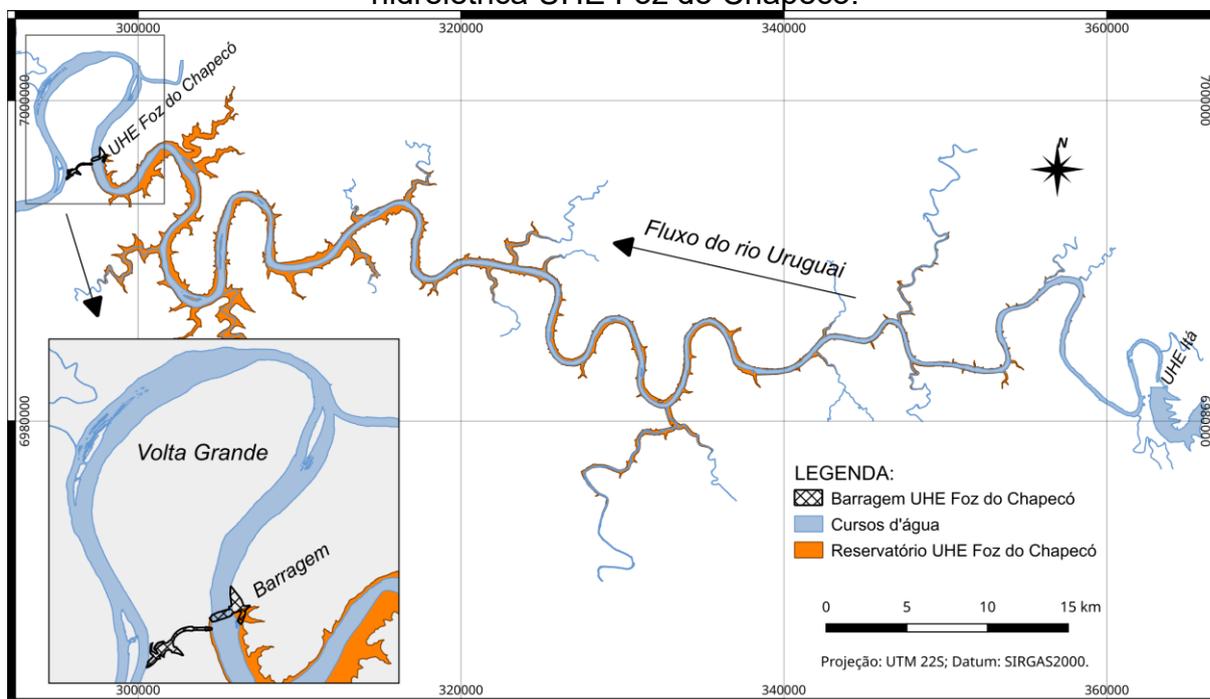
Fonte: Elaborada pelo autor.

A implantação do aproveitamento hidrelétrico de Foz do Chapecó ocorreu por meio da instalação de barramento do rio Uruguai 6 km a montante da foz do rio Chapecó. O local da implantação favorece a geração de energia, em função das características geográficas. A existência de um meandro no rio Uruguai (Volta Grande) permite o aproveitamento de uma diferença natural de altitude. O empreendimento está inserido na porção a jusante da Sub-Bacia 73 do rio Uruguai e faz parte do sistema de geração de energia e de monitoramento de informações hidrológicas.

A barragem implantada possui aproximadamente 900 m de comprimento e 45 m de altura, além de um vertedouro com capacidade de 62.000 m³/s. A tomada de água da casa de força encontra-se a esquerda do vertedouro, foi escavada em pedra. Após a passagem por geradores, a água é restituída ao rio Uruguai após a Volta Grande, 19 km a jusante da barragem.

A região e o *layout* geral do empreendimento podem ser observadas na Figura 3.

Figura 3 - A região de interesse e o layout geral do empreendimento de geração hidrelétrica UHE Foz do Chapecó.



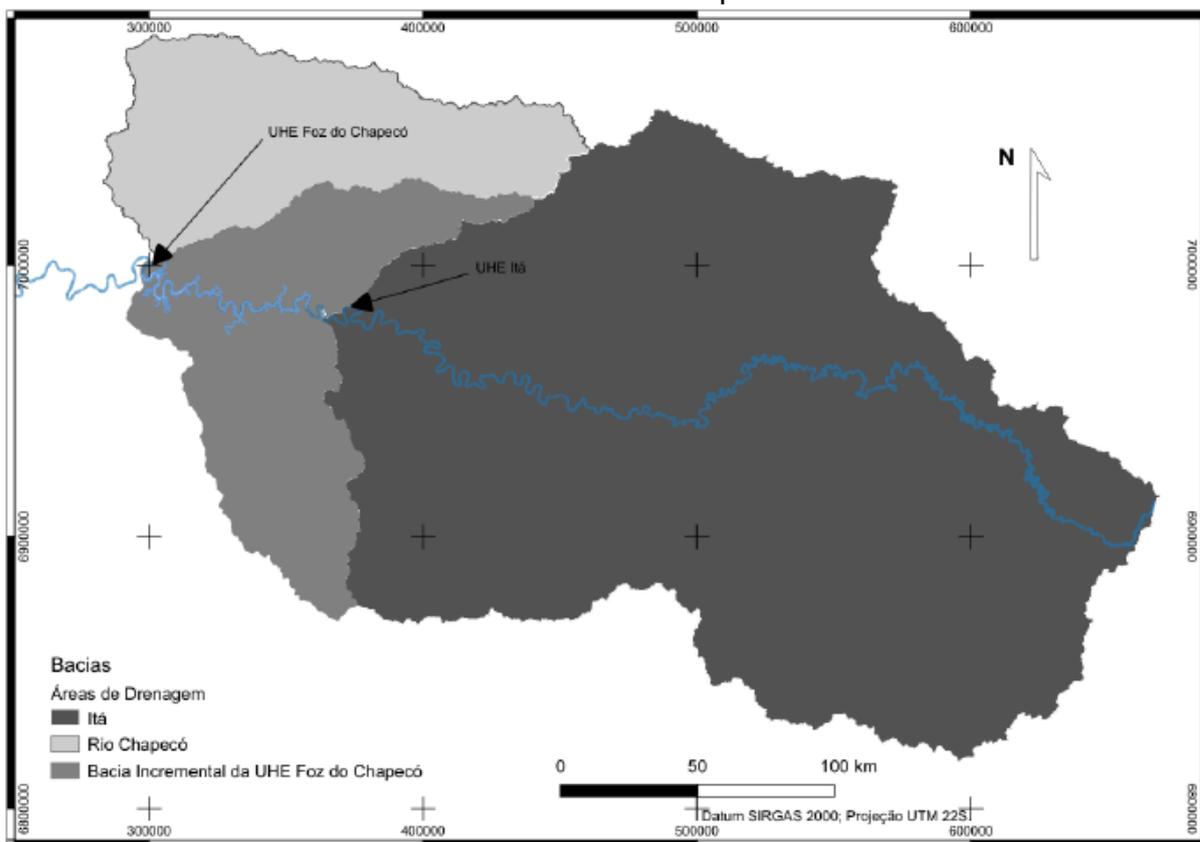
Fonte: Elaborada pelo autor.

A usina hidrelétrica funciona a fio d'água, com reservatório em nível máximo normal na cota 265 m e o mínimo normal na cota 264 m. Ao nível normal máximo a área do reservatório é de 79,9 km² e o volume acumulado é de 1501 hm³. Considerando apenas o trecho sobreposto ao leito natural do rio Uruguai, o reservatório possui 115 km de comprimento. O volume útil da usina, entre as cotas 264 m e 265 m, foi estimado em 74,3 hm³.

O local onde a barragem foi implantada possui uma área de drenagem aproximada de 53.000 km². A montante do reservatório, a principal contribuição corresponde a descarga originária da usina hidrelétrica de Itá, que possui uma área de drenagem de 44.000 km². No trecho do rio Uruguai entre as barragens de Itá e Foz do Chapecó, os principais tributários são o rio Passo Fundo e Irani. No trecho de vazão reduzida (Volta Grande), o rio Uruguai recebe ainda descarga do rio Chapecó, com uma área de drenagem de 8240 km².

A Figura 4 mostra a bacia de contribuição até a UHE de Itá, a bacia incremental do trecho entre Itá e a UHE Foz do Chapecó, além da bacia do rio Chapecó, que é tributário do rio Uruguai no trecho de vazão reduzida do empreendimento.

Figura 4 - Área das bacias de contribuição para o rio Uruguai, no trecho afetado pela usina de Foz do Chapecó.



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.2 DADOS DE MONITORAMENTO HIDROLÓGICO

Em função das dimensões das bacias de drenagem que contribuem para o trecho do rio Uruguai, há uma variação significativa nos regimes de chuva, uso e ocupação do solo, pedologia, geologia, evapotranspiração e fluxo da água subterrânea nessa região. A complexidade natural do estudo das vazões, no caso desse trecho do rio Uruguai, se acentua em função da existência de diversos empreendimentos hidrelétricos posicionados a montante.

Para avaliar o panorama de disponibilidade e utilização dos recursos hídricos, foi realizado um levantamento de fontes oficiais (DRH/SEMA-RS, 2007; SANTA CATARINA, 2017) a respeito do uso do solo, principais atividades produtivas e disponibilidade hídrica nas bacias hidrográficas da região entre as hidrelétricas de Foz do Chapecó e Itá. A área possui aproximadamente 9000 km² e está dividida entre os estados de Rio Grande do Sul e Santa Catarina.

Em relação à disponibilidade hídrica, é possível notar que as regiões têm médias proporcionais a área de drenagem. A vazão de longo termo (QMLT) é um pouco maior na bacia do rio Passo Fundo. As informações quanto à disponibilidade hídrica podem ser observadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Disponibilidade hídrica das sub-bacias.

Bacia	QMLT [m³/s]	Q95 [m³/s]	Q Esp. [L/s/km²]
Sub-Bacias SC	94,02	19	28,3
Irani	48,84	10,26	28,9
Ariranha/Egano	23,46	3,82	29,6
Tigre/Lambedor	21,72	4,93	25,7
Passo Fundo	130,3	13,5	26,9

Fonte: DRH/SEMA-RS 2007) e Santa Catarina 2006).

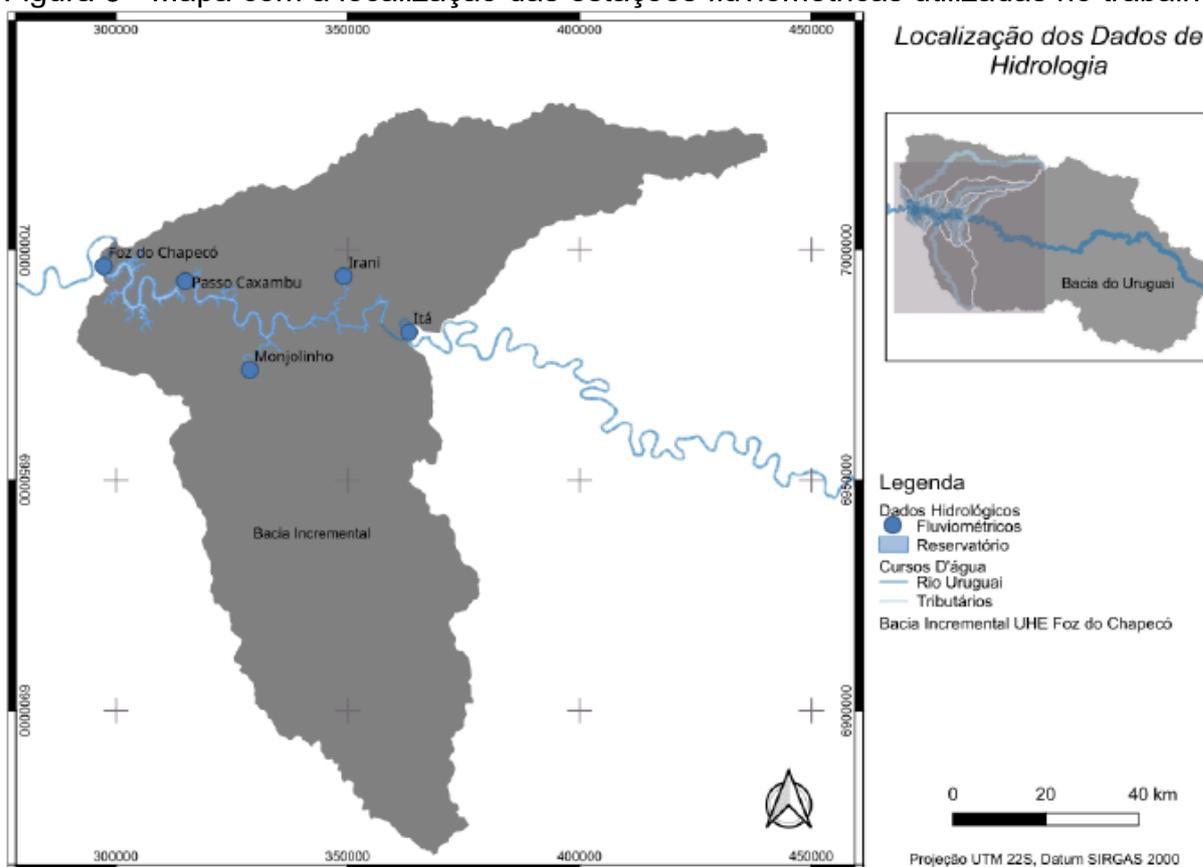
Para a avaliação do comportamento hidrológico da região, foram obtidos dados de vazão em estações fluviométricas e pontos de monitoramento da ONS (usinas da região).

Os dados de vazão coletados foram utilizados com propósitos diferentes: avaliar o panorama histórico da área e estimar vazões no período das análises de qualidade da água nos pontos de monitoramento de qualidade da água. Além dos dados de vazão, foram utilizados também dados de altimetria para estimar as áreas de contribuição nos pontos de amostragem.

Para a avaliação do panorama histórico, foram obtidos dados da estação fluviométrica Passo Caxambu (cod. 73550000 – ANA) e do próprio empreendimento (ONS). A informação foi analisada com o objetivo de avaliar valores médio, a sazonalidade e dados extremos. Importante notar que a vazão nesse trecho do Uruguai sofreu influência do início da operação da UHE de Itá, em 16 de dezembro de 1999, a montante e também da operação de Foz do Chapecó. O que será considerado na análise histórica.

A estimativa das vazões em cada ponto de amostragem de qualidade de água durante o período de monitoramento, foi realizada utilizando dados da ONS (nos aproveitamentos hidrelétricos) e da ANA na estação do rio Irani. A localização das estações fluviométricas utilizadas para o trabalho pode ser observada na Figura 5.

Figura 5 - Mapa com a localização das estações fluviométricas utilizadas no trabalho.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O Quadro 3 apresenta cada um dos pontos utilizados na análise da hidrologia, com sua origem, tipo de estação e para que objetivo foi utilizado no trabalho.

Quadro 3 - Identificação dos pontos utilizados na avaliação da hidrologia da área.

Nome da Estação	Código da Estação	Origem dos dados	Objetivo dos dados para o estudo
Passo Caxambu	73550000	ANA	Histórico das vazões
Foz do Chapecó	2753028	ONS	Estimar vazões
Monjolinho	2752028	ONS	Estimar vazões
Irani	73350000	ANA	Estimar vazões
Itá	73200080	ONS	Estimar vazões

Fonte: Elaborada pelo autor.

4.3 DADOS DE MONITORAMENTO DE QUALIDADE DA ÁGUA

Os dados de qualidade da água foram obtidos junto ao processo de licenciamento ambiental da Usina Hidrelétrica de Foz do Chapecó, que vem sendo conduzido pelo Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA, 2018). No processo administrativo que tramita no órgão ambiental federal, foram estabelecidos uma série de programas de monitoramento ambiental.

O programa de monitoramento de qualidade da água do empreendimento vem sendo desenvolvido desde junho de 2007. A campanha mais recente que se teve acesso foi realizada em abril de 2018, totalizando 22 campanhas na fase de implantação e 45 na fase de operação do empreendimento. O enchimento do reservatório da usina ocorreu em meados de setembro de 2010.

Foram monitoradas as seguintes variáveis de qualidade da água superficial: Temperatura da Água (TA), Turbidez (Tur), Transparência (Trp), Sólidos Totais (ST), Condutividade Elétrica (CE), Oxigênio Dissolvido (OD), Oxigênio Saturado (ODS), Nitrito (NO₂), Nitrato (NO₃), Nitrogênio Total (NT), Dureza (Dur), Cloretos (CL), pH, Fósforo Total (PT), Fosfato Total (PO₄), Ferro (Fe), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Demanda Química de Oxigênio (DQO), Óleos e Graxas (OeG), Alcalinidade (Alc), Cádmiio (Cd), Fenóis (Fen), Clorofila-a (Cl-a), Coliformes Totais (CoT), Coliformes Fecais (CoF). Durante as coletas em campo são determinadas as variáveis Oxigênio Dissolvido, Oxigênio Saturado, Temperatura da Água, pH, Condutividade Elétrica e Transparência. Para a análise das demais variáveis, após a preservação é realizado o envio aos laboratórios responsáveis.

Durante a execução do programa de monitoramento de águas superficiais ficou estabelecido que a metodologia para análise laboratorial deveria seguir as recomendações do *Standart Methods for Examination of Water and Wastewater* (APHA, 1998) ou procedimentos estabelecidos no Guia Nacional de Coleta e Preservação de Amostras (CETESB/ANA, 2011). No período de monitoramento (2007-2018), 4 laboratórios foram responsáveis pelas análises.

Os pontos de monitoramento estão localizados no curso do rio Uruguai (4 a montante e 2 a jusante) e nos tributários (7 a montante e 1 a jusante). A nomenclatura dos pontos foi alterada da configuração original do programa para facilitar a localização geográfica. A identificação dos pontos foi estabelecida pela

junção de três componentes: a primeira letra identifica se o ponto está no Uruguai ou no tributário (U ou T), seguido por um número, que indica a posição relativa de montante para jusante, e outra letra indicando se está a montante ou jusante da barragem de Foz do Chapecó.

A Figura 6 mostra os pontos de monitoramento de qualidade da água no mapa.

Figura 6 - Mapa com a localização dos pontos das campanhas de monitoramento da qualidade de água e descritos por Dal Magro (2015).



Fonte: Elaborada pelo autor.

É possível observar os pontos de amostragem em vermelho, com as respectivas nomenclaturas, identificando os locais de monitoramento do programa de qualidade de água do empreendimento. Em verde, estão identificados os locais de amostragem realizados nas campanhas descritas por Dal Magro et al. (2015) – a serem apresentados na seção seguinte.

A Tabela 2 apresenta os pontos de monitoramento da qualidade da água, com sua nomenclatura, descrição do rio, distância no rio Uruguai para o ponto mais a montante - U1M (no caso de tributários a distância da foz), margem que o tributário se encontra, distância do ponto no tributário em relação a foz, cotas e o regime hídrico após a implantação da Usina Hidrelétrica.

Tabela 2 - Descrição dos pontos de monitoramento da qualidade da água do trecho do Alto Rio Uruguai e tributários.

Ponto	Descrição	Dist. no Uruguai para U1M (km)	Margem do Tributário	Dist. no Uruguai (km)	Cota (m)
U1M	Reservatório Montante	-			265
T1M	Rio Ariranha	11,3	D	11,8	330
T2M	Rio Irani	26,4	D	13,2	272
U2M	Uruguai	45,1			265
T3M	Rio Passo Fundo	47,1	E	2,4	265
T4M	Rio Tigre	67,5	D	13,4	380
T5M	Rio dos Índios	69,0	E	10,8	520
T6M	Rio Lambedor	78,7	D	3,9	265
U3M	Uruguai	80,1			265
T7M	Lajeado Bonito	105,1	E	11,8	300
U4M	Uruguai	118,5			265
U5J	Uruguai	123,2			235
T8J	Rio Chapecó	126,6	D	5,4	226
U6J	Uruguai	140,3			225

Fonte: Elaborada pelo autor.

Importante notar, como será mostrado na seção de Resultados, que parte dos dados de qualidade da água coletados no programa (entre junho de 2007 e abril de 2018) apresentavam inconsistências relacionadas a diferenças nos resultados dos laboratórios. Isso impossibilitou a utilização de toda a série de resultados de qualidade da água. Para suprir a lacuna, dados de outras fontes foram utilizados para avaliar o estado das águas na área de estudo.

4.3.1 Análise de dados de qualidade de água de Programa de Produtividade Pesqueira

Os dados descritos no trabalho de Dal Magro et al. (2015) foram obtidos como parte do Programa de Monitoramento da Produtividade Pesqueira e da Qualidade do Pescado do empreendimento. Os dados foram publicados no livro Impactos Socioambientais da Implantação da Hidrelétrica Foz do Chapecó (DAL MAGRO et al., 2015).

Cabe destacar que, apesar dos dados desse programa de Produtividade Pesqueira constarem do processo de licenciamento ambiental do empreendimento, não foram incorporados ao programa de Monitoramento de Qualidade da Água.

No monitoramento descrito por Dal Magro et al. (2015) foram realizadas 15 campanhas de campo, entre junho de 2007 e dezembro de 2010, com a análise laboratorial de variáveis físico, químicas e biológicas da qualidade da água, em 13 pontos de monitoramento no rio Uruguai e tributários da região. Alguns dos pontos de monitoramento estavam posicionados nas proximidades dos locais de amostragem do programa de monitoramento de qualidade da água, descrito anteriormente.

Saliente-se que o período de realização das coletas cobre parte do período de construção da usina hidrelétrica (com exceção da última campanha realizada em dezembro de 2010, em que a barragem já estava em operação).

Para diferenciar as campanhas de monitoramento de qualidade da água, os dados apresentados nessa seção serão identificados como “Programa de Produtividade Pesqueira” em contraposição aos dados do Programa de Monitoramento de Qualidade da Água.

A comparação entre a localização dos pontos de monitoramento do Programa de Produtividade Pesqueira e os do Programa de Qualidade da Água do processo de licenciamento de Foz do Chapecó podem ser observados na Figura 6.

As variáveis de qualidade de água avaliadas foram: temperatura - TA, pH e oxigênio dissolvido – OD (no local de coleta) e Cor, Sólidos totais, Turbidez, Demanda bioquímica de oxigênio – DBO, Demanda química de oxigênio – DQO, Condutividade elétrica, Nitrito, Nitrato, Amônia, Nitrogênio total, Fósforo Total, Óleos e graxas, Coliformes totais, Coliformes termotolerantes e Clorofila-a (em laboratório). Para a realização das análises em laboratório, foram seguidos os métodos descritos no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, edição de 1998 (DAL MAGRO et al., 2015).

4.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS

Todos os procedimentos para preparação, exploração e análise dos dados foram realizados com o *software* R (R CORE TEAM, 2019). A manipulação de dados geográficos, produção de mapas e geoprocessamento foram realizados com a utilização do *software* QGIS (QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2019) e rotinas do GRASS (GRASS DEVELOPMENT TEAM, 2017).

Cada objetivo específico do trabalho tem seu próprio esquema metodológico. Na sequência serão mostrados os objetivos específicos e os métodos utilizados para alcançá-los. Todos os testes estatísticos foram aplicados com intervalo de confiança (95%).

- **Caracterizar o regime hídrico em relação à vazão e sazonalidade no trecho do Uruguai e tributários influenciados pelo empreendimento;**

A hidrologia é uma forçante natural quando se trata de qualidade da água. Em vista da influência que exerce no sistema formado a partir da operação da barragem de Foz do Chapecó é necessário que as vazões do trecho sejam caracterizadas do ponto de vista histórico. Para isso é importante avaliar as médias históricas, sazonalidade e valores extremos, considerando as particularidades do local.

Por outro lado, a avaliação da carga de contaminantes que chega ao reservatório é um produto da vazão e das concentrações de cada contribuinte. Assim, é necessário que os dados de vazão nos pontos de monitoramento de qualidade da água sejam mensurados, para avaliar a importância das cargas no trecho em estudo.

O posto fluviométrico de Passo Caxambu está localizado a 40 km a montante do local onde a barragem foi implantada. Ele registra dados de vazão do rio Uruguai entre os anos de 1940 a 2010 e foi desativado nas vésperas do início do funcionamento da barragem. O monitoramento da vazão feito pela ONS no local do barramento da UHE de Foz do Chapecó, possui dados de 1999 a 2019.

Em função da diferença nos locais de monitoramento, é necessário transpor a vazão da estação de Passo Caxambu para o barramento de Foz. No trabalho de Farias et al. (2009), são descritos os dados para a realização do projeto da hidrelétrica, incluindo a avaliação hidrológica. Neste documento, a equação para transposição dos dados de Passo Caxambu para Foz é apresentada (Equação 1):

$$Q_{\text{Foz do Chapecó}} = 1,0064 Q_{\text{Passo Caxambu}} \quad (1)$$

Essa transformação foi utilizada para compatibilizar os dados da ANA e ONS neste trabalho.

Outro detalhe a ser observado na área, diz respeito à implantação das Usinas Hidrelétricas de Itá a montante do trecho, e a própria Foz do Chapecó, no rio Uruguai. O início de operação de Itá se deu em meados de dezembro de 1999, e Foz do Chapecó em meados de setembro de 2009. Essas barragens exercem influência na área e devem ser avaliadas com objetivo de caracterizar as vazões históricas.

No período em que há medidas concomitantes (ANA e ONS) de vazão, foram utilizados os dados da ONS, uma vez que são do local onde a barragem foi implantada.

Para avaliação dos valores de tendência central da vazão, os três grupos foram comparados com o teste não paramétrico de *Wilcoxon*. Para avaliação dos valores extremos, foram extraídos os *quantis* de vazão dos três períodos e analisadas as curvas de permanência.

Para avaliação das diferenças climáticas dentro do ano, foi realizada a aplicação do Índice de Sazonalidade, proposto por Walsh e Lawler (LIVADA; ASIMAKOPOULOS, 2005) nos dados de vazão. Esse índice identifica a maneira como a chuva é concentrada no ano e pode variar de 0 (zero) a 1,83: onde zero significa que não existe diferença de precipitação entre os meses e 1,83 onde toda a chuva está concentrada em um único mês. Para aplicação do índice, os valores de vazão no local da barragem de Foz do Chapecó foram utilizados. A equação do Índice de Sazonalidade é mostrada a seguir (Equação 2):

$$\bar{SI} = \frac{1}{R} \sum_{n=1}^{n=12} \left| \bar{x} - \frac{R}{12} \right| \quad (2)$$

Onde SI é o índice, R é a precipitação anual média, x é a precipitação média do mês. Como o Índice é utilizado para precipitação, a equação foi adaptada para as unidades de medida de vazão.

Para a aplicação, foram calculados os SI de cada ano de dados, e depois o valor médio foi extraído. Esse procedimento é recomendável uma vez que a utilização das médias dos meses individuais agrupados subestima o índice (LIVADA; ASIMAKOPOULOS, 2005).

Por fim, para avaliar se os dados dos três períodos apontavam intervalos sazonais de seca e cheia, os valores de vazão foram comparados com o teste de *Wilcoxon* para avaliar diferenças significativas.

Após caracterização das vazões do rio Uruguai no ponto de implantação da barragem, é necessário estimar as vazões nos demais pontos de monitoramento de qualidade da água que não possuem medição de vazão. O programa de monitoramento de qualidade da água possui 14 pontos de amostragem no rio Uruguai e tributários, sendo que deles apenas 4 possuem controle de vazão (vide Figura 5).

Para tanto, foi realizado o levantamento das áreas de drenagem referentes aos pontos de análise de qualidade de água, com base nos dados morfométricos das bacias hidrográficas. Esse cálculo foi realizado com o uso do QGIS e rotinas do GRASS.

Os arquivos *rasters* fazem parte da base de dados de relevo e da topografia do Brasil, obtidos na missão conhecida como SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), disponíveis no site da Embrapa. A resolução espacial da imagem é de 90 metros.

Importante notar que os pontos de controle da vazão, aproveitamentos hidrelétricos, e estações pluviométricas na região estudada foram levantados por Souza et al. (2015). Nesse documento, os autores demonstram algumas discrepâncias nas áreas de contribuição declaradas para cada ponto de controle na ANA e as calculadas com base na imagem STRM.

No caso do presente estudo, os valores calculados por meio do STRM de 90 metros de resolução espacial foram mantidos, uma vez que as diferenças entre as fontes (Hidroweb - ANA e ALMEIDA et al., 2016) e as áreas calculadas, nos pontos onde a amostragem qualidade de água e de vazão coincidem, foram de pequena magnitude (menores do que 2%).

As imagens que representam a elevação da bacia hidrográfica a montante da hidrelétrica de Foz do Chapecó foram agrupadas, reprojatadas para coordenadas planas (UTM) e recortadas com base na delimitação da bacia realizada pela ANA.

A partir da imagem com as elevações foram gerados dados de direção da drenagem (função GRASS *r.watershed*), delimitação de áreas de contribuição e

segmentos de cursos d'água (função GRASS *r.water.outlet*). Na sequência, a bacia de contribuição de cada ponto de aferição da qualidade de água foi gerada.

Com as áreas calculadas e os dados de vazão dos postos fluviométricos, é possível inferir as vazões de pontos onde não há controle. Nesses pontos a estimativa das vazões foi realizada (Equação 3) com base na proporção da área da bacia de drenagem correspondente ao ponto.

$$Q_{\text{afluente_Foz}} = Q_{\text{defl_Itá}} + Q_{\text{defl_Monjolinho}} + Q_{\text{Irani}} + Q_{\text{Bacias_Secundárias}} - Q_{\text{perdas}} \quad (3)$$

Q é a vazão em cada um dos pontos identificados nos subscritos. Ressalta-se que os dados de vazão de Itá, Foz, Irani e Monjolinho são efetivamente medidas por ANA e ONS.

As perdas como remoções para uso humano, evapotranspiração e perda para o lençol no trecho do reservatório foram desprezadas.

A vazão das bacias secundárias, correspondem ao somatório do escoamento nas sub-bacias onde não há controle de vazão na área incremental da UHE Foz do Chapecó. Nessa lógica, o valor das bacias secundárias foi obtido subtraindo a vazão de Itá, Irani e Passo Fundo da vazão afluenta de Foz. Esse montante foi dividido uniformemente pelo restante da área da bacia incremental. Assim, a vazão de cada ponto foi estabelecida de acordo com a área da bacia de contribuição. Esse cálculo foi realizado a cada mês em que houve coleta de água para avaliação da qualidade.

A partir da estimativa das vazões nos pontos são obtidos os valores médios de vazão para o período em que ocorreram as análises de qualidade da água.

- **Avaliar consistência do programa de monitoramento de qualidade da água para mensurar os impactos ambientais do empreendimento.**

Antes da análise estatística, os dados de qualidade da água precisam passar por pré-processamento. De acordo com Serrano Balderas (2017), essa etapa é crítica para a análise e compreende a resolução de problemas nos dados, entendimento da natureza dos dados, e extração de conhecimento do conjunto de

dados e seu domínio de aplicação. Estão incluídas nessa etapa, a verificação de inconsistências e confiabilidade dos dados.

Na fase de análise de consistência, os dados do Programa de Monitoramento da Qualidade da Água passaram por uma avaliação em relação a existência de dados brancos, censurados, *outliers* e valores não numéricos. Esses dados foram separados por tipo (numérico, branco, censurado e outros) quantificados e identificados conforme a variável.

Os valores extremos (*outliers*) foram avaliados e correções, com base nos laudos disponíveis, foram realizadas. Além disso, foram realizadas correções na nomenclatura de algumas variáveis registradas equivocadamente.

Na etapa seguinte, os dados corrigidos passaram por avaliação em relação à consistência em função da alteração de laboratórios (4 no período de monitoramento). Essa análise constatou inconsistências e parte das análises deve que ser descartada. Os dados utilizados para a continuação do trabalho, relacionados a um laboratório específico, foram selecionados com base em critérios como período de análise, número de amostras, acreditação entre outros.

Na sequência, os parâmetros descritivos (mínimos, máximos, média e intervalo de confiança (95%), mediana, desvio padrão, assimetria e curtose) de cada variável de qualidade da água foram extraídos. Os parâmetros de estatística descritiva de variáveis com alguma quantidade de dados censurados foram obtidos por meio da técnica ROS, indicado por Shumway et al. (2002) para dados com múltiplos limites de detecção.

Ainda na etapa de descrição, foram preparados gráficos com a distribuição das variáveis e gráficos *quantil-quantil* para avaliar se os dados seguiam a distribuição normal. Neste mesmo propósito, os testes de *Shapiro-Wilk* e *Anderson-Darling* foram aplicados e confirmaram que as variáveis não seguiam a distribuição normal. A transformação *Box-Cox* foi utilizada para avaliar de que forma as variáveis poderiam se aproximar da distribuição normal. Um novo conjunto de dados com as transformações foi formado com as variáveis de qualidade da água.

Tendo em vista a restrição em relação aos dados anteriores à formação do reservatório, detectados por meio da análise de consistência, dados disponíveis no programa de monitoramento de Produtividade Pesqueira e publicados por Dal Magro et al. (2015) foram descritos, com os mesmos parâmetros utilizados para os dados do Programa de Qualidade da Água.

Dessa etapa resultaram dados de qualidade da água devidamente consistidos, descritos e, quando necessário, transformados.

- **Dimensionar as cargas de indicadores de eutrofização a que o reservatório está sujeito**

A formação do reservatório altera o regime hídrico de parte do rio Uruguai em função da construção do barramento. Em virtude disso, forma-se um sistema em que é possível avaliar não só as concentrações, mas também as cargas de determinados elementos presentes na água e importantes para os processos biológicos que governam o reservatório.

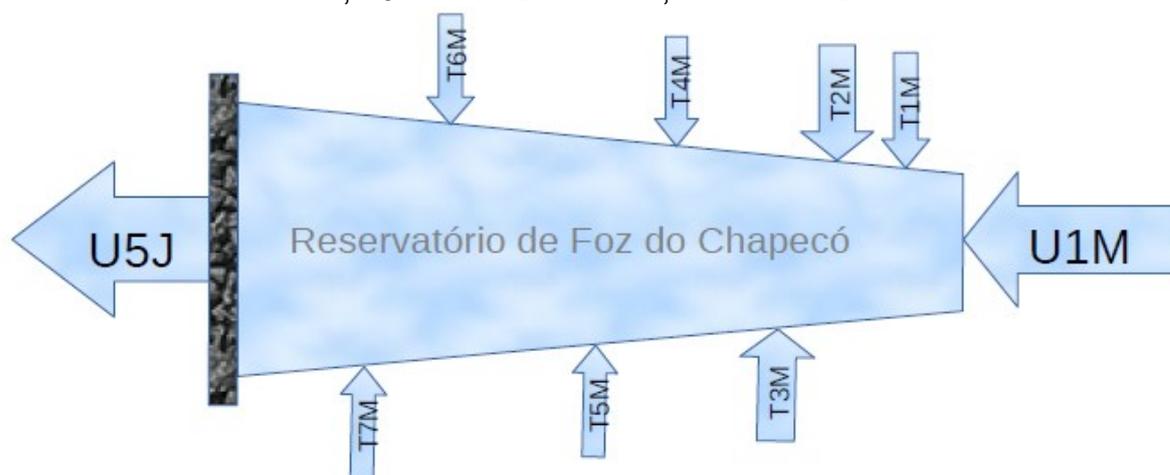
Para esse cálculo, foram selecionadas as variáveis Nitrogênio Total e Fósforo Total em função da sua importância para os processos biológicos e Cloretos que, além de ser indicador de lançamento de esgotos sanitários em corpos d'água, tem como característica ser um elemento conservativo. Os dados de concentração são originários da análise de consistência (Seção 5.2.1) e os dados de vazão da estimativa dos pontos (Seção 5.1.2).

As cargas são calculadas com base nas concentrações de interesse e a vazão, conforme Equação 4:

$$\text{Carga} = \text{Concentração} \times \text{Vazão} \quad (4)$$

O sistema formado pela instalação da UHE de Foz do Chapecó pode ser representado de acordo com a Figura 7.

Figura 7 - Esquema de entrada de cargas no reservatório da UHE Foz do Chapecó. Sendo: U1M – Uruguai Montante; U5M – Uruguai Jusante da Barragem; T1M – Rio Ararinha; T2M – Rio Irani; T3M – Rio Passo Fundo; T4M – Rio Tigre; T5M – Rio dos Índios; T6M – Rio Lamberdor; T7M – Rio Bonito.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Cabe destacar que a saída do sistema na prática está dividida entre o volume vertido mais o turbinado. Contudo, não há ponto de monitoramento de qualidade da água que avalie o líquido que passa pelas turbinas. Os valores de concentração do Ponto U6J (jusante) recebem a contribuição do rio Chapecó (T8J) que não sofre influência direta da UHE. Assim, as concentrações do U5J para as variáveis de qualidade da água e a soma das vazões turbinadas e vertidas foram utilizadas para o cálculo da carga de saída do sistema.

Após efetuadas as transformações de unidade, as cargas dos três elementos de interesse foram plotadas na linha do tempo, com todas as entradas, entradas reunidas e saídas. As cargas das contribuições de montante foram apresentadas em uma tabela indicando o percentual de contribuição das entradas no reservatório.

Com as cargas calculadas, os dados foram usados para avaliar a produção desses indicadores de ocupação antrópica nas bacias hidrográficas analisadas. Para isso, os valores das cargas mensais foram divididos pelas áreas de drenagem do ponto de monitoramento. Os resultados foram apresentados em forma de mapas, usando a escala de cores para mostrar os valores encontrados.

- **Avaliar as variáveis de qualidade da água e localidades simultaneamente para verificar a existência de inter-relações e fatores de influência.**

Com um número considerável de variáveis, existe a necessidade de avaliar a estrutura e as inter-relações entre elas. Da mesma forma, em função da existência de um número elevado de localidades monitoradas é importante saber se existem semelhanças na formação da água nesses pontos.

Para iniciar avaliação quanto a existência dessas relações, as variáveis que passaram pela análise de consistência, aos pares, foram comparadas para verificar o grau de correlação entre elas. Para o cálculo da correlação foram utilizados os dados transformados segundo *Box-Cox* com substituição dos valores censurados pela metade do limite de detecção e com os métodos de Pearson e Spearman.

O Ponto T8J foi removido da análise, uma vez que a qualidade de água não sofre ou exerce influência no reservatório de Foz do Chapecó.

A análise de componentes principais (PCA) foi utilizada para explorar de que forma as variáveis podem ser agrupadas. Para esse procedimento, os dados foram transformados, conforme estabelecido na aplicação da técnica *Box-Cox*, e estandardizados (onde cada valor é subtraído pela média e dividido pelo desvio padrão). Antes da realização do PCA foram aplicados os testes de Esfericidade de *Barlett* e KMO, para avaliar a adequação dos dados à técnica.

Apesar do PCA não exigir que os dados sigam a distribuição normal, os dados transformados foram utilizados para evitar assimetria extrema. Para definição do número de componentes a ser retido, foi utilizado o critério da raiz latente.

As componentes retidas foram interpretadas de acordo com as circunstâncias e forçantes que influenciam a qualidade da água na região.

Para avaliação da forma como as localidades se relacionam, foram utilizadas as técnicas de agrupamento hierárquico e *k-means*. Para tanto, foram extraídos os escores dos 4 primeiros fatores criados pelo PCA para cada amostra coletada e os dados de todas as campanhas foram vinculados ao respectivo ponto de monitoramento.

O primeiro teste aplicado foi agrupamento hierárquico. O método de cálculo da distância escolhido foi o Euclidiano e o método de agrupamento Ward.

Após a aplicação desses procedimentos é possível estabelecer as variáveis inter-relacionadas com a PCA e os pontos de monitoramento similares com a análise de agrupamento.

- **Avaliar alterações na qualidade da água em função da similaridade dos pontos, dos períodos de sazonalidade da vazão, da localização dos pontos e da alteração do regime hídrico do trecho do rio Uruguai**

Encerrada a fase exploratória, foram iniciados os testes para avaliar possíveis diferenças nos conjuntos de dados. Os testes de hipótese não-paramétricos utilizados foram U de *Wilcoxon* (2 amostras) e *Kruskal-Wallis* (mais de 2 amostras). Para dados censurados o teste de Peto-Peto, modificado do teste *Gehan-Wilcoxon* e implementado pelo pacote NADA (LEE, 2017) no *software* R, foi utilizado.

O Ponto T8J foi removido da análise, uma vez que a qualidade de água não sofre ou exerce influência no reservatório de Foz do Chapecó.

O primeiro teste de hipótese realizado dizia respeito à similaridade das localidades identificadas na análise de agrupamento. As variáveis individualmente foram testadas para os grupos formados (3). Os testes de *Kruskal-Wallis* e Peto-Peto foram aplicados no período posterior ao fechamento da barragem. Para aplicação do KW, foram usados os dados com valores censurados substituídos pela metade do valor do limite de detecção. O teste Peto-Peto é adaptado para dados censurados. Nas variáveis onde diferenças significativas foram encontradas, para avaliar os grupos em pares foram aplicados testes *posthoc* de Nemenyi e Dunn. Os resultados foram apresentados em forma de tabela e gráficos, demonstrando as diferenças detectadas.

Os testes *Kruskal-Wallis* e Peto-Peto também foram utilizados para avaliar as diferenças nas variáveis de qualidade da água no interior do reservatório. A hipótese nula era de que não havia diferenças significativas nos pontos. Nas variáveis onde diferenças significativas foram encontradas, para avaliar os grupos em pares foram aplicados testes *posthoc* de Nemenyi e Dunn. Os resultados foram apresentados em forma de tabela e gráficos, demonstrando as diferenças detectadas.

Na sequência foram avaliados os efeitos da sazonalidade da vazão na qualidade da água. Para isso foram escolhidos os testes de hipótese não-paramétricos de *Wilcoxon* e Peto-Peto (censurados), em que a hipótese nula é de que não havia diferença significativa na qualidade de água de grupos amostrados em período de estiagem e cheia. Para remover a influência de formação do reservatório nessa avaliação, foi selecionado o período posterior ao fechamento da barragem. Os pontos avaliados foram os do rio Uruguai, no trecho compreendido pelo reservatório (U1M a U4M). Os resultados foram apresentados em forma de tabela e gráficos, demonstrando as diferenças detectadas.

Para avaliação das diferenças em função da implantação da usina, foi realizada comparação entre distribuições das variáveis de qualidade da água em período anterior e posterior ao fechamento da barragem (setembro de 2010). Em razão da escassez de dados para o período anterior ao fechamento da barragem no programa de monitoramento de Qualidade da Água, os dados descritos por Dal Magro et al. (2015), que fazem parte do programa de Produtividade Pesqueira do empreendimento foram utilizados. Os pontos de monitoramento localizados no reservatório dos dois programas foram agrupados e comparados para avaliar as diferenças, nas variáveis de qualidade da água coincidentes. Os intervalos de tempo das análises de cada grupo foram segregados para evitar intersecção entre os períodos. Para a avaliação, os métodos não-paramétricos de *Wilcoxon* e Peto-Peto foram utilizados e os resultados apresentados por meio de tabelas e gráficos.

5 RESULTADOS

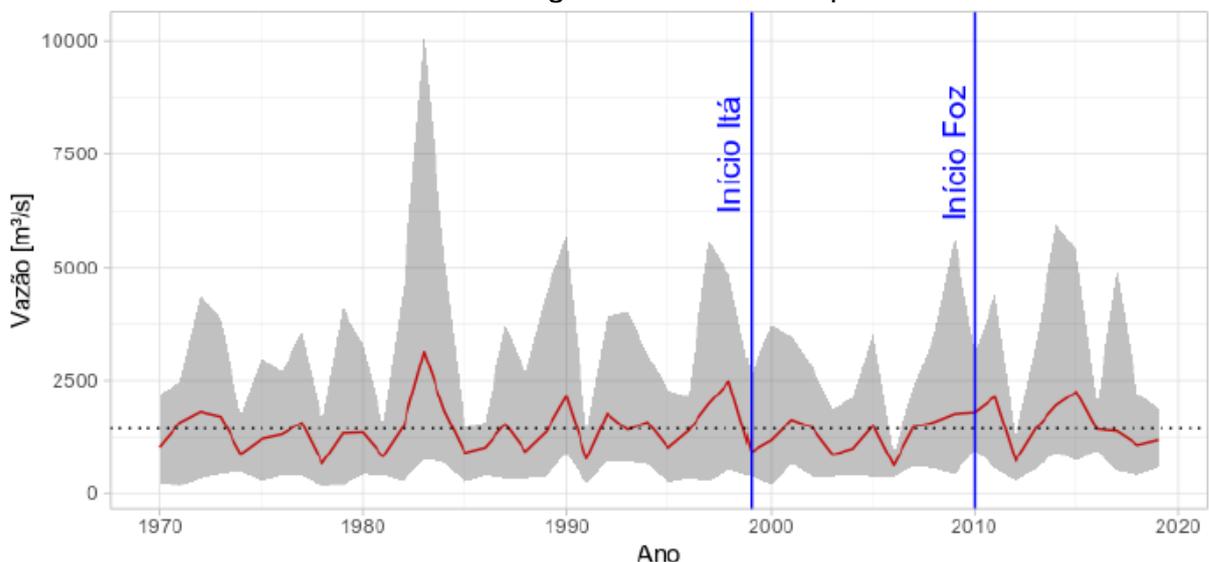
5.1 HIDROLOGIA

Os resultados da avaliação hidrológica estão divididos na avaliação das vazões históricas e estimativa das vazões nos pontos de monitoramento de qualidade da água.

5.1.1 Vazões históricas

Para caracterização do histórico das vazões no trecho, foram selecionados 30 anos (1970-1999) de dados médios mensais anteriores a implantação dos empreendimentos hidrelétricos.

Figura 8 - Linha do tempo dos valores médios, mínimos e máximos mensais por ano, no local da barragem de Foz do Chapecó.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os dados foram organizados, para extração dos valores médios, máximos e mínimos anuais para todo o período. A Figura 8 mostra a linha do tempo dos valores médios e amplitude das vazões para o local. Os dados de vazão anual podem ser observados na Tabela 3.

Tabela 3 - Mínimas, médias e máximas vazões mensais para os anos de 1970-2019. As linhas sombreadas indicam o funcionamento das UHEs de Itá e Foz do Chapecó.

Ano	Mínimas [m³/s]	Médias [m³/s]	Máximas [m³/s]	Ano	Mínimas [m³/s]	Médias [m³/s]	Máximas [m³/s]
1970	254	1033	2202	1995	264	1013	2285
1971	173	1574	2466	1996	346	1392	2148
1972	347	1814	4406	1997	292	1984	5599
1973	444	1705	3869	1998	530	2482	4846
1974	501	877	1706	1999	393	928	2620
1975	285	1207	3013	2000	216	1186	3733
1976	417	1309	2691	2001	668	1638	3469
1977	419	1571	3582	2002	390	1461	2811
1978	163	665	1567	2003	391	868	1867
1979	196	1334	4114	2004	420	996	2120
1980	434	1350	3291	2005	385	1520	3590
1981	420	819	1495	2006	379	626	861
1982	288	1507	4608	2007	610	1482	2389
1983	770	3133	10155	2008	564	1583	3488
1984	683	1839	5261	2009	428	1766	5681
1985	272	905	1473	2010	966	1796	3102
1986	411	1023	1578	2011	561	2143	4413
1987	347	1542	3749	2012	295	716	1221
1988	353	932	2643	2013	554	1448	3300
1989	389	1367	4430	2014	916	1955	5945
1990	890	2155	5701	2015	725	2266	5377
1991	236	772	1357	2016	955	1421	1944
1992	718	1778	3909	2017	512	1377	4952
1993	706	1409	4026	2018	423	1077	2215
1994	646	1586	3090	2019	581	1188	1889

Fonte: Elaborada pelo autor.

A partir dos valores de médias mensais, ocorreu a caracterização de cada um dos períodos por meio da extração dos parâmetros de estatística descritiva. A Tabela 4 mostra, para cada período avaliado, o número de observações, as datas de início e fim do período, os valores de mínima, máxima, média, desvio padrão e coeficiente de variação e os meses em que as vazões máximas e mínimas ocorreram.

Tabela 4 - Descrição dos dados de vazão para Foz do Chapecó nos diferentes períodos hidrológicos.

Período	N. Obs.	Início	Fim	Min. [m ³ /s]	Máx. [m ³ /s]	Média [m ³ /s]	Desvio Padrão [m ³ /s]	Coef. Variação	Data Máx.	Data Mín.
Pré Itá	360	1970-01	1999-12	163	10155	1433	1141	0,80	1983-07	1978-05
Pós Itá	129	2000-01	2010-09	216	5681	1355	951	0,70	2009-09	2000-03
Pós Foz	111	2010-10	2019-12	295	5945	1508	1015	0,67	2014-06	2012-05
Total	600	1970-01	2019-04	163	10155	1430	1079	0,76	1983-07	1978-05

Fonte: Elaborada pelo autor.

O teste não-paramétrico de *Wilcoxon* foi aplicado e não foram detectadas diferenças significativas tanto entre os grupos, “Pré Itá” versus “Pós Itá” (valor-p = 0,94) quanto entre “Pré Itá” versus “Pós Foz” (valor-p = 0,61).

Se por um lado, as diferenças entre valores medianos nos grupos não podem ser confirmadas, é ainda necessário que se realize uma avaliação em relação a valores extremos nos diferentes períodos.

Para avaliação de vazões extremas, foram plotadas as curvas de permanência das médias mensais, e extraídos os valores de acordo com os *quantis* de interesse. Os resultados podem ser observados na Tabela 5.

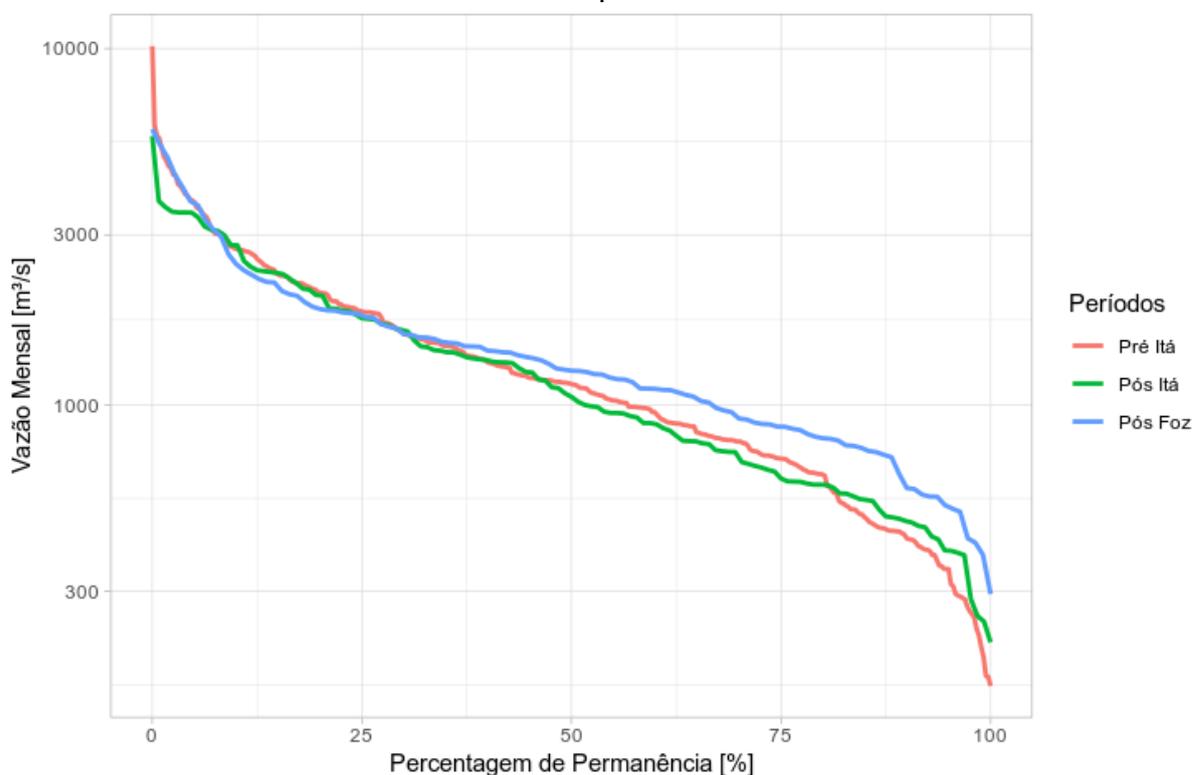
Tabela 5 - Quantis de vazão com base nas curvas de permanência de cada período no rio Uruguai.

Período	Unidade.	Q95%	Q90%	Q50%
Pré Itá	[m ³ /s]	344,9	423,1	1144,8
Pós Itá	[m ³ /s]	390,4	472,0	1054,0
Pós Foz	[m ³ /s]	518,0	2019-	1248,0

Fonte: Elaborada pelo autor.

Como é possível notar, há um aumento nas vazões mínimas no período Pós Foz. Essa diferença pode ser observada também na Figura 9, que mostra as curvas de permanência para os três períodos.

Figura 9 - Curva de permanência para os três períodos hidrológicos na UHE Foz do Chapecó.



Fonte: Elaborada pelo autor.

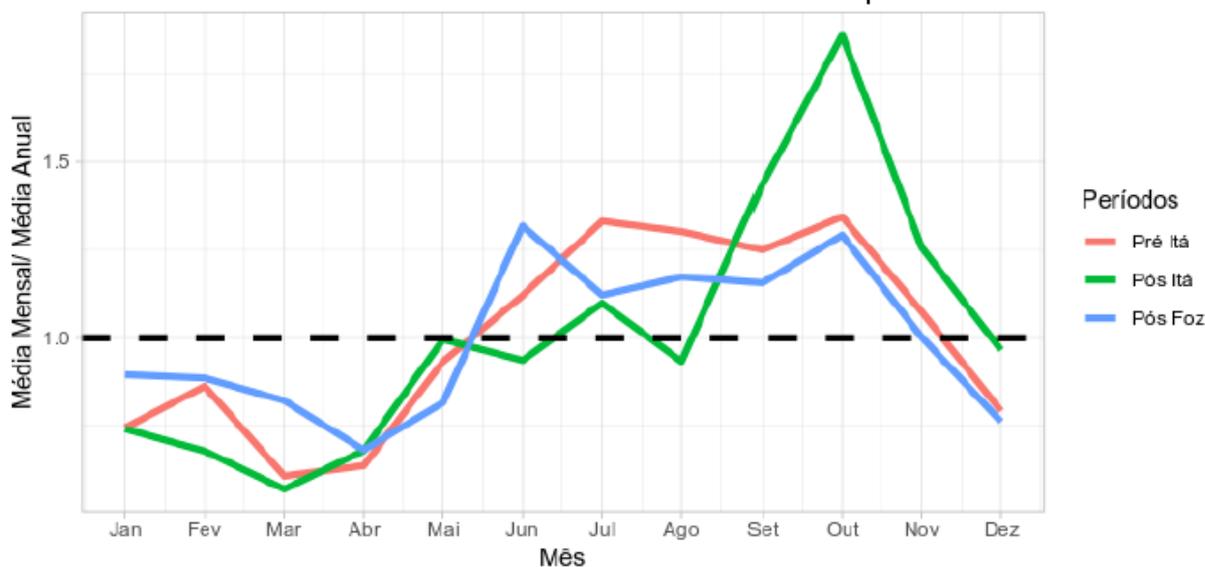
O achatamento na curva de permanência indica que houve uma equalização das vazões menores no trecho de estudo, onde a probabilidade da ocorrência de secas extremas diminuiu no período posterior à implantação da barragem de Foz do Chapecó. A partir da constatação da alteração na curva de permanência nos diferentes períodos, foi realizada a aplicação do Índice de Sazonalidade (SI).

O valor médio dos SIs anuais para a vazão do trecho do rio Uruguai, onde está localizada Foz do Chapecó, no período anterior à implantação dos empreendimentos, foi de 0,48, que corresponde a classificação de Walsh e Lawler (1981) apud Livada e Asimakopoulos (2005) a uma “estação bastante sazonal, com uma estação seca mais curta”. Para os períodos “Pós Itá” o SI médio foi também de 0,48. No período “Pós Foz” o SI médio foi de 0,38, o que muda o enquadramento da classificação de Walsh e Lawler para a categoria de “uniforme com uma estação mais úmida definida”, o que poderia indicar uma alteração na sazonalidade do trecho.

Para avaliar a sazonalidade durante o ano, os valores de vazão mensal foram comparados com as médias anuais. Na Figura 10, valores maiores do que 1

(um) mostram vazões mensais maiores do que a média anual e vice-versa. As amostras foram separadas de acordo com os períodos.

Figura 10 - Climatologia da vazão proporcional para os três períodos hidrológicos na barragem da UHE Foz do Chapecó, rio Uruguai, considerando um desvio padrão acima e abaixo da média como faixa de amplitude.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os valores proporcionais de vazão média para cada mês e os desvios padrão, nos respectivos períodos hidrológicos podem ser observados na Tabela 6.

Tabela 6 - Médias e Desvios Padrão da proporção das vazões mensais e anuais para Foz do Chapecó.

Mês	Médias			Desvios Padrão		
	Pré Itá	Pós Itá	Pós Foz	Pré Itá	Pós Itá	Pós Foz
1	0,75	0,74	0,90	0,44	0,42	0,25
2	0,86	0,68	0,89	0,45	0,40	0,29
3	0,61	0,57	0,82	0,25	0,30	0,26
4	0,64	0,68	0,68	0,39	0,42	0,20
5	0,93	1,00	0,82	0,69	0,50	0,53
6	1,12	0,94	1,32	0,56	0,44	1,17
7	1,33	1,10	1,12	0,70	0,35	0,42
8	1,30	0,93	1,17	0,66	0,40	0,65
9	1,25	1,44	1,16	0,66	0,98	0,55
10	1,34	1,86	1,29	0,65	0,67	0,59
11	1,07	1,26	1,00	0,69	0,46	0,29
12	0,79	0,97	0,76	0,51	0,54	0,34

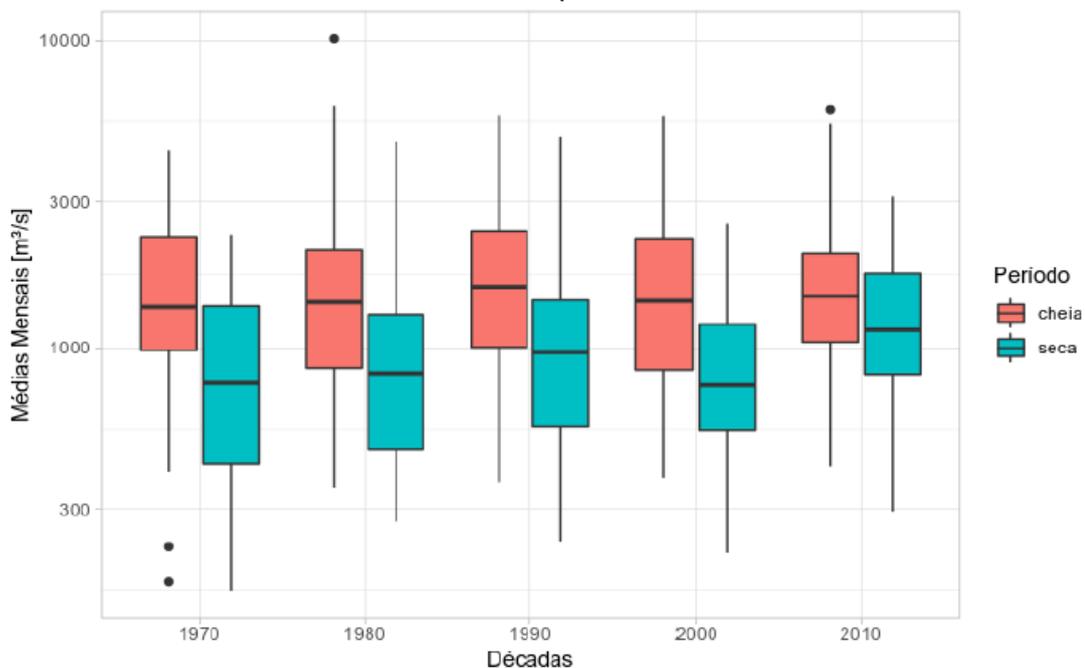
Fonte: Elaborada pelo autor.

De forma geral, é possível notar que as vazões mensais médias são superiores às médias anuais nos meses de junho a novembro e inferiores de

dezembro a maio. Para avaliar se há diferença significativa em relação aos grupos formados pelos meses identificados na análise gráfica, como de cheia e seca no rio, foi aplicado o teste de *Wilcoxon* para os três períodos. A hipótese nula é de que as vazões de seca e cheia são iguais e o intervalo de confiança é de 95%. Por meio do teste aplicado é possível rejeitar a hipótese de que os períodos de seca a cheia sejam iguais (Valores-p de $6,3e-12$, $1,7e-5$ e $5,1e-3$, para os três períodos, em ordem cronológica).

Na figura 11 é possível ver o gráfico *boxplot* com os dados de vazão separados pelo período de seca (dezembro a maio) e cheia (junho a novembro) ao longo das décadas de monitoramento.

Figura 11 - Variação de vazões entre as décadas em épocas de cheia e seca em Foz do Chapecó.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Além da identificação dos períodos de cheia e seca, também é possível notar que a partir da implantação de Foz do Chapecó, as vazões médias nos períodos de cheia e seca foram amenizadas (com exceção ao mês de junho) se comparadas com os outros períodos.

Resumo dos resultados da análise histórica da hidrologia:

Não houve alteração significativa nos valores médios de vazões mensais nos três períodos hidrológicos: anterior à implantação da UHE Itá, após o início da operação de Itá e após o início da operação da UHE de Foz do Chapecó.

Os valores dos Índices de Sazonalidade, aplicado aos três períodos hidrológicos mostram uma alteração no padrão estacional a partir da operação da hidrelétrica de Foz do Chapecó, passando o trecho, antes enquadrado como “estação bastante sazonal, com uma estação seca mais curta” para “uniforme com uma estação mais úmida definida”. Essa alteração implica, em teoria, na amenização da componente sazonal no trecho estudado.

A conclusão a respeito da amenização da sazonalidade foi corroborada pela análise de dados extremos, que apontou o aumento das vazões Q90% e Q95% a partir da implantação de Foz do Chapecó.

Apesar da amenização das curvas de sazonalidade, é possível notar que o período compreendido entre junho e novembro apresentam valores de vazão mensais maiores do que a média anual, enquanto os meses entre dezembro e maio menores. Os testes de hipótese comparando as vazões entre esses grupos, mostram diferenças significativas nos três períodos hidrológicos.

5.1.2 Estimativa de vazões nos pontos de monitoramento

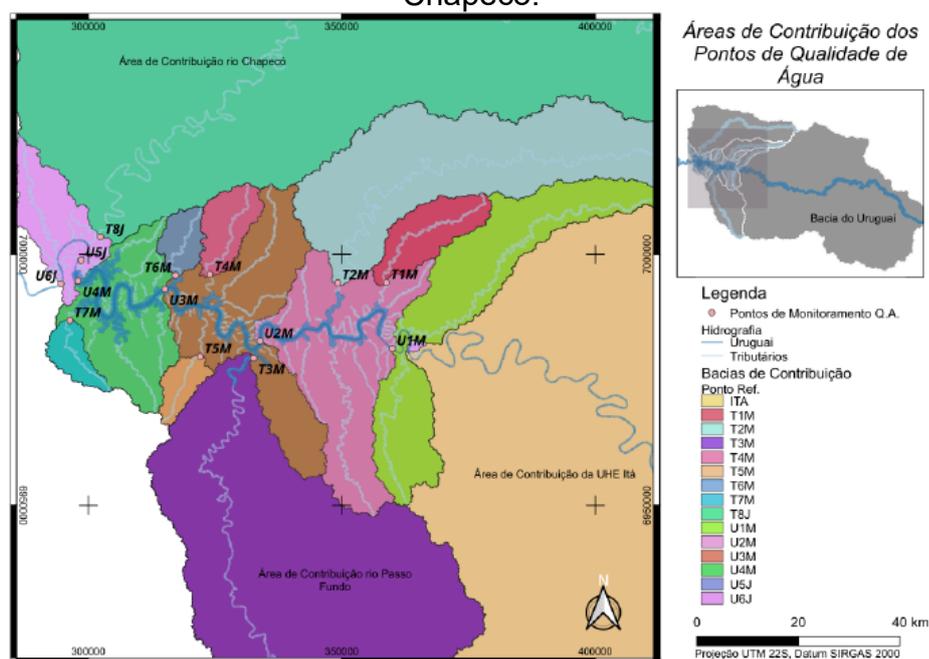
A estimativa das vazões dos pontos de amostragem de qualidade da água é utilizada para dimensionar as cargas que passam pelo sistema. Esse dimensionamento inclui o cálculo da área de contribuição das bacias e a estimativa das vazões desconhecidas.

5.1.2.1 Cálculo da área das bacias

Os cálculos da área de contribuição referente aos pontos de análise de qualidade de água foram realizados com conforme metodologia descrita no item 4.4 do trabalho.

A Figura 12 mostra alguns detalhes do mapa gerado no procedimento de medição das áreas de contribuição de cada ponto de monitoramento de qualidade da água.

Figura 12 - Áreas de contribuição dos pontos de qualidade da água da UHE Foz do Chapecó.



Fonte: Elaborada pelo autor.

As áreas das bacias de contribuição de cada ponto de monitoramento de qualidade da água extraída por meio dos procedimentos descritos na metodologia podem ser observadas na Tabela 7.

Tabela 7 - Áreas de contribuição e fonte de dados de vazão para os pontos de qualidade da água.

Ponto de Referência	Área de Contribuição [km ²]	Fonte de Informação para vazão
ITÁ	44195	Dados do ONS
T1M	207	Estimação com base na área da bacia
T2M	1501	Dados da ANA
T3M	3869	Dados do ONS
T4M*	148	Estimação com base na área da bacia
T5M**	81	Estimação com base na área da bacia
T6M	91	Estimação com base na área da bacia
T7M	86	Estimação com base na área da bacia
T8J	8288	Dados da ANA
U1M***	871	Dados do ONS e Estimação
U2M***	3416	Dados do ONS, ANA e Estimação
U3M***	8340	Dados do ONS, ANA e Estimação
U4M***	8945	Dados do ONS, ANA e Estimação
U5J****	-	Dados do ONS
U6J	61739	Dados do ONS, ANA e Estimação

* T4M – Rio Tigre possui estação na ANA, mas as medições são a partir de janeiro de 2013.

** T4M – Rio do Índio possui estação na ANA, mas as medições são a partir de julho de 2013.

*** Área indicada referente a bacia incremental do UHE Foz do Chapecó. Para totalização da área é necessário acrescentar a bacia de contribuição de Itá.

**** U5J – Ponto localizado no trecho de vazão reduzida, portanto controlado pelo montante de água vertido no empreendimento, a partir do início de sua operação.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Além das informações referentes à área de contribuição, a Tabela 7 descreve a fonte de onde os dados de vazão foram extraídos ou estimados.

5.1.2.2 Estimativa de vazões nos pontos de qualidade da água

As vazões para avaliação das cargas que entram e saem do sistema reservatório no período em que ocorreu a análise de qualidade de água foram obtidas dos dados existentes nos 3 pontos de controle da ONS e 1 da ANA. Nos pontos de qualidade de água onde esse controle de vazão não existe, a estimativa da vazão foi realizada com base na proporção da área da bacia de drenagem correspondente ao ponto e conforme a Equação 3.

Com base nos cálculos realizados de vazão para cada um dos pontos de monitoramento de qualidade de água é possível obter os valores médios para o período em que foram realizadas as coletas. A Tabela 8 mostra as vazões médias em épocas de seca, chuva e no total das datas de monitoramento de qualidade da água para cada um dos pontos de análise.

Tabela 8 - Vazões médias por período nos pontos de monitoramento de qualidade da água.

Ponto	Vazão na Seca [m ³ /s]	Vazão na Cheia [m ³ /s]	Vazão em Todo Período [m ³ /s]
T1M	5,4	9,4	7,5
T2M	33,2	60,0	47,1
T3M	75,2	120,7	98,7
T4M	3,9	6,8	5,4
T5M	2,1	3,7	2,9
T6M	2,4	4,2	3,3
T7M	2,2	3,9	3,1
T8J	176,7	290,1	235,4
U1M	899,5	1605,6	1264,7
U2M	965,7	1721,7	1356,8
U3M	1094	1946,3	1534,8
U4M	1109,7	1973,9	1556,7
U5J	311,2	1037,7	687,0
U6J	1285,0	2221,1	1769,2

Fonte: Elaborada pelo autor.

5.2 QUALIDADE DA ÁGUA

Para a avaliação da qualidade da água é inicialmente importante que os dados passem por uma avaliação de consistência, para garantir a validade das conclusões da análise. Na sequência é extraída a estatística descritiva dos dados consistidos.

5.2.1 Análise de Consistência dos dados de qualidade da água

Os dados do monitoramento foram obtidos do processo de licenciamento ambiental de Foz do Chapecó, no Programa de Monitoramento de Qualidade da Água. O programa vem sendo executado de junho de 2007 a abril de 2018, em 14 locais de monitoramento, analisando 25 variáveis de qualidade da água. Nesse período 4 diferentes laboratórios foram responsáveis por analisar as amostras de água, quando a mensuração não podia ser realizada em campo. Cabe ainda destacar que, em algumas campanhas, a quantificação de Clorofila era realizada por um laboratório diferente do que fazia as análises das demais variáveis.

Com os dados organizados é necessário que passem por uma fase de verificação de inconsistências. Primeiro, a análise concentrou-se na identificação de casos com valores em branco. Foram removidas linhas que possuíam mais de 90% dos valores de suas variáveis por preencher (da campanha de dezembro de 2015).

Quando da adequação do formato dos dados para as análises, foi possível identificar a quantidade de dados não numéricos presentes no conjunto. Os caracteres não-numéricos são valores censurados, valores em branco ou outro tipo de informação. A Tabela 9, discrimina a quantidade de dados (e sua percentagem relativa) em cada variável.

Tabela 9 - Quantidade de dados, por tipo de informação contida em cada variável (e suas percentagens entre parênteses).

Variável	Sigla	Numéricos (%)	Censurados (%)	Em branco (%)	Outros Valores (%)
Temperatura da Água	TA	931 (99,9)		1 (0,1)	
Turbidez	Tur	932 (100,0)			
Transparência	Trp	834 (89,5)		1 (0,1)	97 (10,4)
Sólidos Totais	ST	925 (99,2)	7 (0,8)		
Condutividade Elétrica	CE	932 (100,0)			
Oxigênio Dissolvido	OD	917 (98,4)		15 (1,6)	
Oxigênio Saturado	ODS	916 (98,3)		16 (1,7)	
pH	pH	932 (100,0)			
Alcalinidade	Alc	931 (99,9)	1 (0,1)		
Cloretos	Cl	875 (93,9)	57 (6,1)		
Dureza	Dur	890 (95,5)	14 (1,5)	28 (3)	
Cádmio	Cd	1 (0,11)	627 (66,7)	312 (33,2)	
Ferro	Fe	919 (98,6)	13 (1,4)		
Nitrogênio Total	NT	871 (93,5)	61 (6,5)		
Nitrato	NO3	923 (99,0)	9 (1,0)		
Nitrito	NO2	337 (36,2)	478 (51,3)	117 (12,6)	
Fósforo Total	PT	716 (76,8)	216 (23,2)		
Fosfato	PO4	372 (39,9)	558 (59,9)	2 (0,2)	
Demanda Bioquímica de Oxigênio	DBO	364 (39,1)	568 (60,9)		
Demanda Química de Oxigênio	DQO	711 (76,3)	221 (23,7)		
Óleos e Graxas	OeG	263 (28,2)	452 (48,5)	164 (17,6)	53 (5,7)
Fenóis	Fen	129 (13,8)	719 (77,1)	84 (9)	
Clorofila-a	Cl-a	213 (22,9)	593 (63,6)	125 (13,4)	1 (0,1)
Coliformes Fecais	CoF	773 (82,9)	115 (12,3)		44 (4,7)
Coliformes Totais	CoT	889 (95,4)	20 (2,1)		23 (2,5)

Fonte: Elaborada pelo autor.

Como é possível notar, na Tabela 9, algumas variáveis possuem uma quantidade considerável de dados em branco e censurados. Casos extremos, como a variável Cádmio (Cd), apenas um valor foi efetivamente medido. Por essa razão, já nessa etapa a variável foi descartada das análises subsequentes.

A classificação de “Outros Valores” foi utilizada para identificar informações não-numéricas, como a descrição de presença ou ausência de coliformes (e não sua contagem) e a profundidade insuficiente para a medição no ponto de coleta no caso da variável transparência, além de dados censurados a direita.

No conjunto de dados originais, as variáveis Óleos e Graxas (17,6%), Clorofila-a (13,4%), Nitrito (12,55%), Fenóis (9,61%), Dureza (3%), Oxigênio Dissolvido (1,5%), Oxigênio Saturado (1,5%), Fosfato Total (0,2%) e Transparência

(0,1%) possuem dados em branco. Apesar da maior percentagem de dados entre as variáveis faltantes não ultrapassar 13,4%, se considerados apenas os casos completos (que é pré-requisito para aplicação de alguns métodos estatísticos) o conjunto de amostras passa de 932 para 547 (41% de redução). Outra observação a respeito dos dados perdidos é que, avaliando o padrão, é possível descartar que a perda ocorra aleatoriamente.

Outra observação diz respeito aos resultados abaixo do limite de detecção. Os dados censurados, apesar de trazerem dificuldade na análise e incerteza na quantificação da variável, carregam informação importante que não deve ser descartada a princípio para a pesquisa.

Considerando os brancos, censurados e outros valores, apenas as variáveis Turbidez, Condutividade Elétrica e pH possuem todas as amostras com valores numéricos. Das 932 amostras coletadas, apenas 3 casos estariam completos se fossem considerados apenas valores numéricos. Isso exige que seja feito uso de técnicas estatísticas adaptadas aos dados com limite de detecção.

A análise de consistência também avaliou valores discrepantes ou *outliers*. Importante destacar que os dados de qualidade da água analisados foram obtidos em planilha eletrônica. Além da planilha, para uma fração desses dados também foram fornecidos os laudos laboratoriais, que permitiram a comparação de alguns pontos extremos e a correção deles.

No Quadro 4, são listadas as variáveis que sofreram correções nos valores na base de dados, com detalhamento em relação ao ponto, campanha e justificativa para a realização da alteração.

Além das listadas no Quadro 4, foram realizadas alterações nas seguintes variáveis: Coliformes Fecais (16 casos), Coliformes Totais (2 casos), Sólidos Totais (1 caso), Fósforo (12 casos), Fosfato (14 casos), DBO5 (9 casos) e Clorofila-a (6 casos). Essas variáveis apresentavam valores zero em algumas amostras. Como esse valor não pode corresponder ao resultado da análise laboratorial, os valores zero foram substituídos pelo menor valor de censura da variável (em vista do longo período de monitoramento e da alteração dos laboratórios na realização das análises, os valores de censura não são únicos nas variáveis).

Quadro 4 - Alterações nos dados de qualidade da água realizados

Variável	Ponto	Data	Valor Corrigido	Justificativa
Nitrogênio	U1M	Jan/2012	0,01 → 0,6	Dado confirmado no Laudo de Análise. Erro de digitação na planilha.
Nitrogênio	T2M	Set/2010	<0,007 → 6,9	Dado confirmado no Laudo de Análise. Erro de digitação na planilha.
Transparência	U2M	Jun/2016	17,3 → 1,5	Segundo maior valor da série 3,65 m. Média da var. 1,0, Desvio 0,83. Substituição pelo valor médio no ponto 1,5 m
Oxigênio Dissolvido	U4M	Fev/2015	27,5 → NA	O valor de Oxigênio dissolvido é de 27,5 (mesmo da temperatura) e o Oxigênio Saturado é de 108 %.
Oxigênio Saturado	T2M	Jun/2017	9 → NA	O percentual de saturação de oxigênio tem relação com a concentração. Os valores do ponto não correspondem aos valores compatíveis de saturação.
Oxigênio Saturado	U2M	Fev/2018	26 → NA	O percentual de saturação de oxigênio tem relação com a concentração. Os valores do ponto não correspondem aos valores compatíveis de saturação.
Temperatura da Água	T2M	Jun/2014	6,41 → NA	Valor incompatível com os de temperatura da água. Na mesma campanha, o menor valor foi de 14,1 °C.

* NA – *not available* - forma como o *Software R* lida com os dados em branco.

Fonte: Elaborado pelo autor.

No caso da variável Nitrogênio Total, foi constatado que em parte dos resultados os valores correspondiam a variável Nitrogênio Total *Kjeldahl* - que é a soma dos parâmetros nitrogênio orgânico e nitrogênio amoniacal. Para que se chegue ao valor que corresponde à concentração de Nitrogênio Total é necessário somar as variáveis Nitrogênio Total *Kjeldahl*, Nitrito e Nitrato.

Ao longo do programa de monitoramento, 4 laboratórios foram responsáveis pela realização de parte das análises da qualidade da água. A Tabela 10, mostra o período, o número de amostras, o número de campanhas antes e depois do fechamento da barragem, e os valores percentuais de censurados e brancos nas amostras. Para preservar profissionais e empresas envolvidas, os laboratórios de análise de qualidade da água foram identificados como as letras A a D.

Tabela 10 - Resumo da atuação dos laboratórios no monitoramento da UHE Foz do Chapecó.

Laboratório	Período	Num. Campanhas relat. Operação		Censurados (%)	Brancos (%)	Outros (%)
		Antes	Depois			
A	Jun/2007 a dez/2009	16		3,6	6,1	0,5
B	Abr/2010 a ago/2010 e set/2010 a abr/2015	3	26	24,0	1,5	0,9
C	Mar/2011 a jul/2011		3	10,8	1,1	2,4
D	Fev/2010 e Jun/2015 a abr/2018	1	18	23,5	1,1	1,2

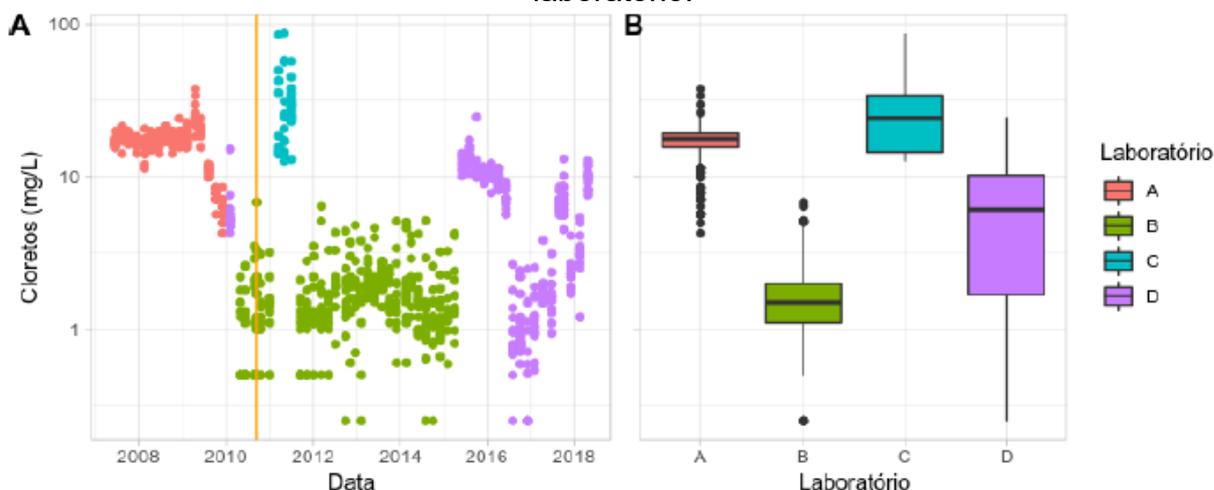
Fonte: Elaborada pelo autor.

Na análise exploratória dos dados de qualidade de água, padrões de medição distintos nas variáveis Cloretos, Fósforo e Coliformes Totais na linha do tempo foram detectados. Essas mudanças bruscas nos resultados coincidem com a alteração de laboratórios.

Para a elaboração dos gráficos a seguir, foi realizada a substituição dos valores censurados nas variáveis pela metade do limite de detecção do método.

A concentração de cloretos ao longo do tempo pode ser vista na Figura 13A. A Figura 13B apresenta o gráfico *boxplot* com as concentrações de Cloretos com os valores agrupados por laboratórios.

Figura 13 - Gráfico com as concentrações de Cloretos. (A) Linha do tempo, com o marco que indica a data de fechamento da barragem. (B) Boxplot separado por laboratório.



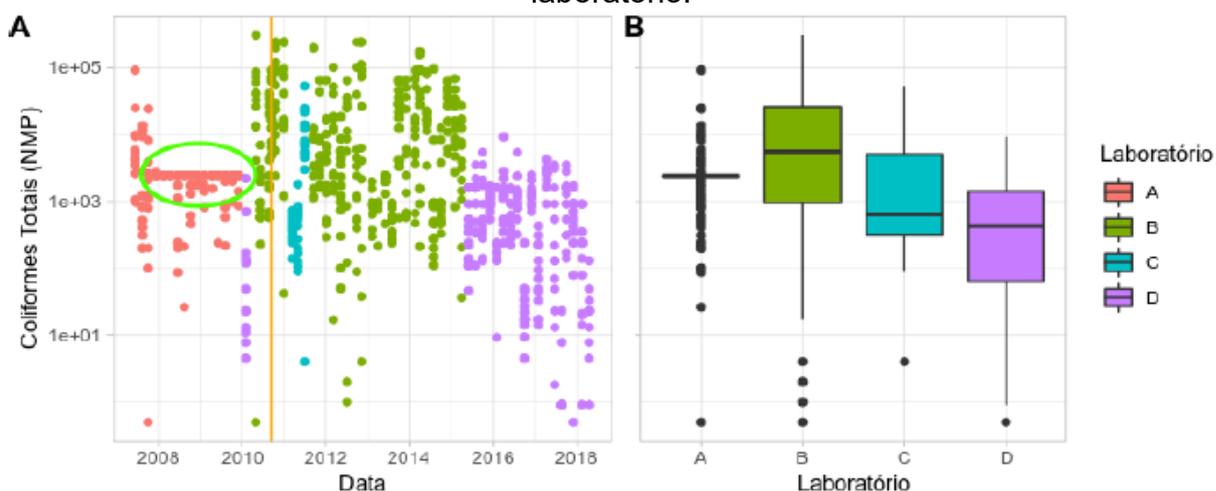
Fonte: Elaborada pelo autor.

Como é possível observar há grande variação nas concentrações que possuem aparente relação com o laboratório que realizou as análises. Destaque-se que as concentrações na Figura 13 estão em escala logarítmica, o que mostra a discrepância nos resultados.

Conforme previamente mencionado, apenas parte dos laudos estavam disponíveis para consulta e verificação. Nos disponíveis não havia informação suficiente para avaliar as metodologias e possíveis incompatibilidades nos resultados.

Os valores de Coliformes Totais apresentaram no período de 2006 a 2010 diversos resultados idênticos na parte superior da contagem (NMP). Isso pode indicar uma limitação do método analítico onde os valores foram censurados à direita. A Figura 14 mostra o comportamento da variável na linha do tempo e por meio de *boxplots*. Na linha do tempo, uma elipse em verde indica o período em que há suspeita de censura a direita. Na consulta aos laudos analíticos disponíveis não há indicação de que os valores são censurados a direita.

Figura 14 - Gráfico com as concentrações de Coliformes Totais - CoT. (A) Linha do tempo, com o marco que indica a data de fechamento da barragem e elipse verde apontando anomalia nos valores máximos de CoT. (B) Boxplot separado por laboratório.

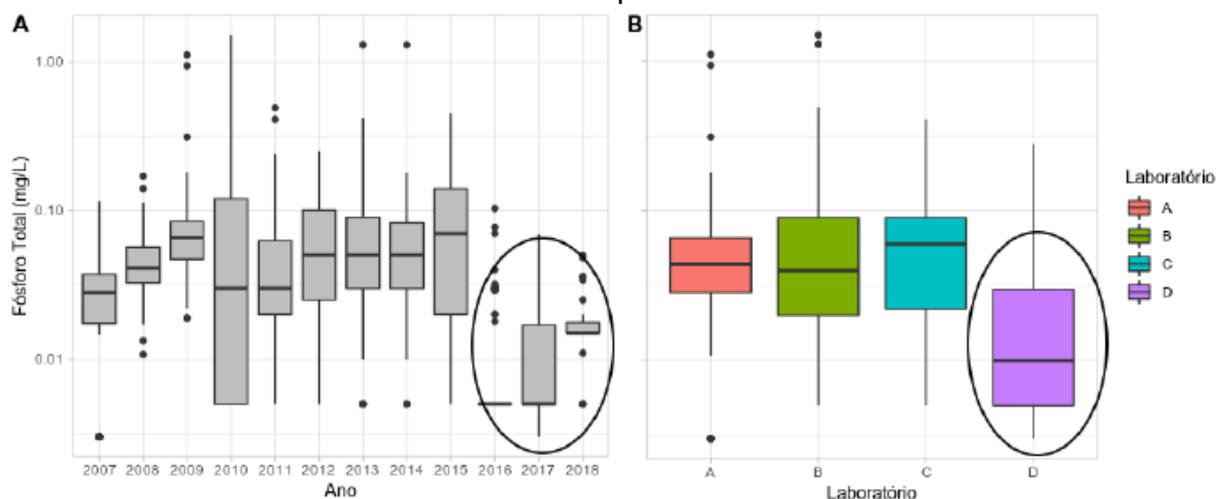


Fonte: Elaborada pelo autor.

A variável Fósforo Total apresenta um comportamento incomum no período mais recente de monitoramento (a partir de 2016). Os valores medianos da variável tiveram sua concentração reduzida, o que coincidiu com a alteração de laboratórios. Não foi possível ter acesso aos laudos de análise desse período para confirmar

valores da planilha, tampouco comparar os métodos de análise entre os dois laboratórios.

Figura 15 - Concentração de Fósforo Total - PT. (A) Boxplot com a distribuições ao longo dos anos, com destaque para os anos 2016-2018. (B). Boxplot a distribuição dos resultados por laboratório.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 15 A e B mostram as concentrações do Fósforo Total agrupadas ao longo dos anos e por laboratórios. O fósforo deve sofrer restrições a medida que os testes estatísticos sejam feitos em razão dessa diferença.

Como é possível observar, as inconsistências nas variáveis coliformes totais, cloretos e fósforo total provavelmente têm relação com a alteração dos laboratórios em que as análises foram realizadas. Essas discrepâncias inviabilizam a comparação dos dados em todo período monitorado, e podem ter sido ocasionadas pela diferença na metodologia utilizada para análise, procedimentos de manuseio ou coleta.

Além do problema nos resultados, foi possível observar que há pouca informação no processo a respeito dos procedimentos de preparação e envio das amostras, o que pode implicar em alteração dos resultados.

Quanto aos laudos de análise que se teve acesso, foi possível notar, especialmente no laboratório A, que não há informação quanto à metodologia aplicada na análise e limites de detecção do método em determinadas variáveis.

Dados Censurados:

Os limites de detecção à esquerda, em geral ocorrem em razão de restrições de determinada metodologia para detectar o elemento de interesse. Quanto ao

assunto, é possível notar no conjunto de dados compilado em planilha eletrônica que existem diversos limites diferentes de detecção para a mesma variável de qualidade da água (inclusive no mesmo laboratório).

Tabela 11 - Limites de detecção das variáveis de qualidade da água por laboratório e os padrões normativos da Resolução CONAMA 357.

Var.	Unid.	Laboratórios				Conama 357/05
		A	B	C	D	Água Doce Classe 2
ST	[mg/L]		<5		<5,0	<500
Alc	[mg/L]		<5			
Cl	[mg/L]		<1; <0,5		<0,5	
Dur	[mg/L]		<5		<0,2; <0,05; <0,5	
Cd	[mg/L]		<0,0001; <0,001	<0,001; <0,005	<0,001; <0,0005	≤0,001
Fe	[mg/L]				< 0,01; <0,06	
						4,5(pH≤7,5) 2,4(7,5<pH≥8,0) 1,2(8,0<pH≥8,5) 0,6(pH>8,5)
NT	[mg/L]		<0,5		<1; < 0,5	≤10
NO3	[mg/L]		<0,1; < 0,3 <0,01; <0,02;		<0,02; <0,1;	
NO2	[mg/L]	ND	<0,1	< 0,001	<0,15; <0,03	≤1,0 lêntico≤0,03 intermediário≤0,05 lótico ≤0,1
PT	[mg/L]		<0,01; <0,05; <0,02	<0,01	<0,01; <0,006; <0,03	
PO4	[mg/L]	ND	<0,01; <0,02; <0,1		<0,3; <0,01; <0,1; <0,25	
DBO	[mg/L]	<1,0	<2,0; <3,0; <5; < 4; < 6; < 7		<1; <2; <0,8 <1; < 2; < 0,8; <25	≤5
DQO	[mg/L]		<5,0 <1; <3; <4; <5; <6 <9; <10	VA; <0,1	Ausente; <10	
OeG	[mg/L]	N.D; <0,01;			<0,001; <0,002;	
Fen	[mg/L]	<0,1; <0,02	<0,001 <0,006; <3;	<0,001	<0,02; <0,1	0,003
Cl.a	[mg/L]	ND	<0,001	<0,006	<3; <1	≤0,03
	[NMP/ 100m		<1; Presentes;			≤1000 em 80%
CoF	L]		Ausentes; <100	<2,2; Ausente	Ausência; < 1,8	de 6 amostra/ano
	[NM P/10		<1; <100;			
CoT	0mL]		Presentes		<1,8	

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 11 mostra os limites de detecção para as variáveis censuradas à esquerda, separada por laboratório. Além disso, a Tabela relaciona os limites da Resolução CONAMA 357, para águas doces Classe II, para que seja possível realizar a avaliação de como os limites de detecção interferem na avaliação do atendimento da norma.

Como é possível notar, para a variável Cádmio, Nitrogênio (dependendo do pH), Fósforo Total (dependendo do regime hídrico), DBO, Fenóis, Clorofila-a os limites de detecção não permitem avaliar o atendimento da norma ambiental. Além disso, chama a atenção a variação de limites de detecção no mesmo laboratório.

Assim, após a análise de consistência, é possível concluir que:

- A falta desse tipo de análise nos dados durante a execução do programa de monitoramento de qualidade da água impossibilitou a detecção de discrepâncias nos resultados analíticos em tempo para que correções fossem feitas, sem comprometer a confiabilidade de parte do conjunto de dados.
- A escolha de laboratórios (ou métodos) para a execução das análises aparentemente não levou em consideração os padrões normativos.
- A definição do laboratório ou do método a ser escolhido deve considerar também as características ambientais identificadas nos estudos para elaboração do empreendimento. Ou seja, não é adequado que a metodologia utilizada para análise não permita que os constituintes da água que se têm interesse em monitorar não sejam detectados pela análise.

Em razão das diferenças constatadas entre laboratórios é necessário selecionar um conjunto de dados que possam ser comparados entre si, que tenham confiabilidade, com base nas informações disponíveis para avaliação da qualidade da água.

A definição dos dados a serem utilizados na continuidade do trabalho levou em consideração critérios de qualidade do laudo, período de duração do monitoramento, possibilidade de acesso à documentação.

O Quadro 5 mostra um resumo dos critérios utilizados para a seleção do laboratório.

Quadro 5 - Análise dos critérios para seleção de laboratório de análise de qualidade da água.

Laboratório	Prós	Contras
A		<ul style="list-style-type: none"> • Sem metodologia de análise; • Sem limites de detecção para algumas variáveis; • Problema na medição de coliformes totais; • Apenas período anterior a operação do empreendimento.
B	<ul style="list-style-type: none"> • Acreditação na ISO/IEC 17025 pelo INMETRO; • Amostragens realizadas antes e depois do fechamento da barragem; • Maior número de análises; • Acesso à parte dos laudos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Pequeno número de campanhas antes da operação.
C		<ul style="list-style-type: none"> • Pequeno número de análises; • Curto período de monitoramento.
D	<ul style="list-style-type: none"> • Acreditação na ISO/IEC 17025 pelo INMETRO; 	<ul style="list-style-type: none"> • Apenas uma campanha no anterior a operação do empreendimento.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Portanto, em razão das diferenças observadas entre laboratórios, optou-se por utilizar os resultados do laboratório B, que possui o maior número de análises realizadas, em um período importante para a qualidade da água em relação aos efeitos do empreendimento, além de possuir certificação da NBR.

Uma vez definido o laboratório é necessário reavaliar a situação das variáveis no que concerne valores censurados, em branco ou com outras informações para o período selecionado. Lembrando que a variável Cádmiu, por possuir apenas um valor numérico em toda a série, foi removida da análise na fase anterior de verificação de consistência. A Tabela 12 mostra as variáveis de qualidade da água com os valores de dados numéricos, censurados à esquerda, em branco e com outros valores, com suas respectivas percentagens, para o período onde o Laboratório B foi responsável pelas análises.

Os dados de qualidade da água do período coberto pelo Laboratório B totalizam 402 amostras coletadas entre abril de 2010 a abril de 2015, excluindo-se o

intervalo de alguns meses em meados de 2011, onde as análises foram realizadas pelo Laboratório C. No período avaliado, nos 14 pontos de monitoramento, foram realizadas 29 campanhas, sendo 3 antes do fechamento da barragem e 26 depois.

Tabela 12 - Tipo de dado contido em cada variável (e suas percentagens entre parênteses) para o período do Laboratório B.

Variáveis	Numéricos (%)	Censurados (%)	Em branco (%)	Outros Valores (%)
TA	401 (99,8)		1 (0,2)	
Tur	402 (100)			
Trp	348 (86,6)		1 (0,2)	53 (13,2)
ST	397 (98,8)	5 (1,2)		
CE	402 (100)			
OD	387 (96,3)		15 (3,7)	
ODS	388 (96,5)		14 (3,5)	
pH	402 (100)			
Alc	401 (99,8)	1 (0,2)		
Cl	351 (87,3)	51 (12,7)		
Dur	366 (91)	8 (2)	28 (7)	
Fe	402 (100)			
NT	385 (95,8)	17 (4,2)		
NO3	393 (97,8)	9 (2,2)		
NO2	79 (19,7)	323 (80,3)		
PT	346 (86,1)	56 (13,9)		
PO4	87 (21,6)	315 (78,4)		
DBO	26 (6,5)	376 (93,5)		
DQO	244 (60,7)	158 (39,3)		
OeG	25 (6,2)	292 (72,6)	85 (21,1)	
Fen	92 (22,9)	310 (77,1)		
Cl.a	45 (11,2)	357 (88,8)		
CoF	356 (88,6)	32 (8)		14 (3,5)
CoT	377 (93,8)	2 (0,5)		23 (5,7)

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 12 mostra em negrito as variáveis com alta percentagem de censura, que foram removidas da análise (NO2, PO4, DBO, OeG, Fen, Cl.a) uma vez que os valores numéricos não ultrapassaram 40% do total das amostras. Além disso, em função da alta correlação com Oxigênio Dissolvido, a variável ODS foi removida. As variáveis CE, Dur e Alc foram removidas em função da baixa significância ambiental.

A DQO possui 38% de seus dados censurados, comprometendo parte da análise, porém é variável importante para avaliação da degradação por compostos químicos e será mantida. As variáveis Trp, CoF e CoT possuem dados não-

numéricos (caracteres), definidos na tabela como “Outros Valores”, que serão desconsiderados nas análises estatísticas. O Quadro 6 resume as características do conjunto de dados a ser analisado para avaliação da qualidade da água.

Quadro 6 - Resumo dos dados a serem analisados após a análise de consistência.

Laboratório	Período	Campanhas	Variáveis	Pontos
B	Abr/2010 a Abr/2015	3 Antes, 26 Depois	TA, Tur, Trp, ST, OD, pH, Cl, Fe, NT, NO3, PT, DQO, CoF, CoT	14

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na medida do possível, as técnicas utilizadas para descrição das variáveis e inferência estatística devem levar em consideração a existência de dados censurados no conjunto.

Concluída a fase de consistência dos dados de qualidade da água, é possível observar que, das 932 amostras, apenas 402 (43%) podem ser utilizadas para comparação. Essa redução compromete a avaliação da qualidade da água de antes e depois da operação da usina por meio do programa de monitoramento de qualidade da água. Outro fator que chama a atenção nessa etapa do trabalho é a impossibilidade de avaliar os processos a que a qualidade da água está submetida, em função da eliminação de variáveis de importância como Clorofila-a, DBO, Nitritos entre outras. A análise dessas variáveis ficou comprometida em razão da existência de dados em branco e censurados no conjunto.

5.2.2 Estatística Descritiva

A estatística descritiva resume as características das amostras por meio de parâmetros de tendência central, dispersão, assimetria entre outras. Esta seção apresenta a descrição dos dados de qualidade da água utilizados no trabalho.

5.2.2.1 Programa de Monitoramento da Qualidade da Água

Os dados de qualidade da água do período do Laboratório B foram selecionados na análise de consistência. Assim, a base de dados, com qualidade de

água, vazões, informações geográficas foi adaptada para o novo período de análise e descrição das variáveis.

Os dados aptos a análise foram avaliados por meio de histogramas para identificação das distribuições e por *boxplots* para avaliar diferenças entre o conjunto de amostras nos respectivos pontos de monitoramento. Nesse caso, os valores censurados foram substituídos por metade do limite de detecção. Os resultados podem ser observados no Apêndice A.

Nessa etapa os histogramas mostram que a maior parte das variáveis apresentam uma distribuição que se aproxima da lognormal. Além disso é possível notar que existem comportamentos distintos entre os pontos de monitoramento, como demonstram os gráficos *boxplot*.

A partir da avaliação gráfica, foram extraídos os parâmetros para caracterização das variáveis. O resultado pode ser observado na Tabela 13.

Tabela 13 - Parâmetros de estatística descritiva dos dados de qualidade da água no período do laboratório B.

Variável	Amostras	Censura	Mínimo	Máximo	Média ± IC (95%)	Mediana	D. Padrão	Assimetria	Curtose
TA	401	0,0%	12,5	33,3	21,5 ± 0,41	21,20	4,21	0,1	-0,9
Tur	402	0,0%	0,45	328	21 ± 4	8,00	40,55	4,1	20,6
Trp	348	0,0%	0,07	3,65	1,08 ± 0,07	1,03	0,68	0,7	0,2
ST	402	1,2%	<5	698	72 ± 6	57,00	63,04	6,0	47,6
OD	387	0,0%	3,88	19,41	8,4 ± 0,2	8,33	2,04	0,9	3,0
pH	402	0,0%	4,6	9,66	7,05 ± 0,07	7,00	0,68	0,7	1,7
Cl	402	12,3%	<0,5	6,8	1,65 ± 0,09	1,50	0,92	2,0	5,8
Fe	402	0,0%	0,0112	27,1	1,0 ± 0,2	0,39	2,38	6,9	60,4
NT	402	7,7%	<0,5	15,06	2,0 ± 0,18	1,36	1,88	3,0	12,5
NO3	402	2,2%	<0,1	6	1,21 ± 0,09	0,90	0,96	1,7	3,5
PT	402	13,5%	<0,01	1,5	0,08 ± 0,01	0,04	0,14	6,8	59,3
DQO	402	38,2%	<5	64	7,4 ± 0,6	6,00	6,41	4,3	26,2
CoF	388	7,7%	<1	155310	1105 ± 874	65	8911	14,6	235,6
CoT	379	0,5%	<1	307600	23894 ± 4452	5560	45406	3,4	13,2

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os parâmetros de estatística descritiva de variáveis com alguma quantidade de dados censurados foram obtidos por meio da técnica ROS. É possível observar na Tabela 13 que as distribuições, em grande parte das variáveis, têm assimetria a direita, com exceção da variável Temperatura da Água. Os valores da curtose indicam que todas as variáveis são leptocúrticas, com curvas de distribuição afuniladas. Esses parâmetros, acrescido das diferenças entre média e mediana, indicam que os dados não seguem a distribuição gaussiana. Além disso, existe grande diferença nas unidades de medida das variáveis, o que torna necessária uma standardização na aplicação de teste que dependam de homogeneidade de valores.

Para avaliação da normalidade as variáveis também passaram por testes de hipótese *Shapiro-Wilk* e *Anderson-Darling*. Os resultados demonstraram que nenhuma das variáveis segue a distribuição gaussiana.

Na sequência foram realizados testes de *Box-Cox* para avaliar as transformações necessárias em caso de uso de métodos paramétricos de inferência. As transformações foram aplicadas nos dados de qualidade de água com os valores censurados substituídos por metade do limite de detecção, e um novo conjunto de dados transformado foi criado. Os valores de lambda calculados foram referências para realização das transformações. Os valores efetivamente usados para a transformação foram arredondados para melhor compreensão dos dados. A Tabela 14 mostra os dados da aplicação da transformação *Box-Cox*.

Tabela 14 - Cálculo dos valores de lambda na transformação Box-Cox, para as variáveis de qualidade da água.

Variável	Lambda Calculado	Intervalo de Conf. Inferior	Intervalo de Conf. Superior	Transformação adotada
TA	0,720	0,226	1,218	Nenhuma
Tur	-0,110	-0,175	-0,046	Log
Trp	0,460	0,331	0,592	Raiz Quadrada
ST	0,156	0,087	0,226	Log
CE	-0,135	-0,316	0,048	Log
OD	0,236	-0,064	0,533	Log
pH*	-0,425	-1,059	0,222	Nenhuma
Cl	0,179	0,047	0,311	Log
Fe	-0,088	-0,151	-0,025	Log
NT	-0,068	-0,169	0,034	Log
NO ₃	0,148	0,054	0,244	Log
PT	-0,022	-0,094	0,049	Log
DQO	-0,289	-0,439	-0,147	Log
CoF	0,015	-0,020	0,049	Log
CoT	0,091	0,052	0,132	Log

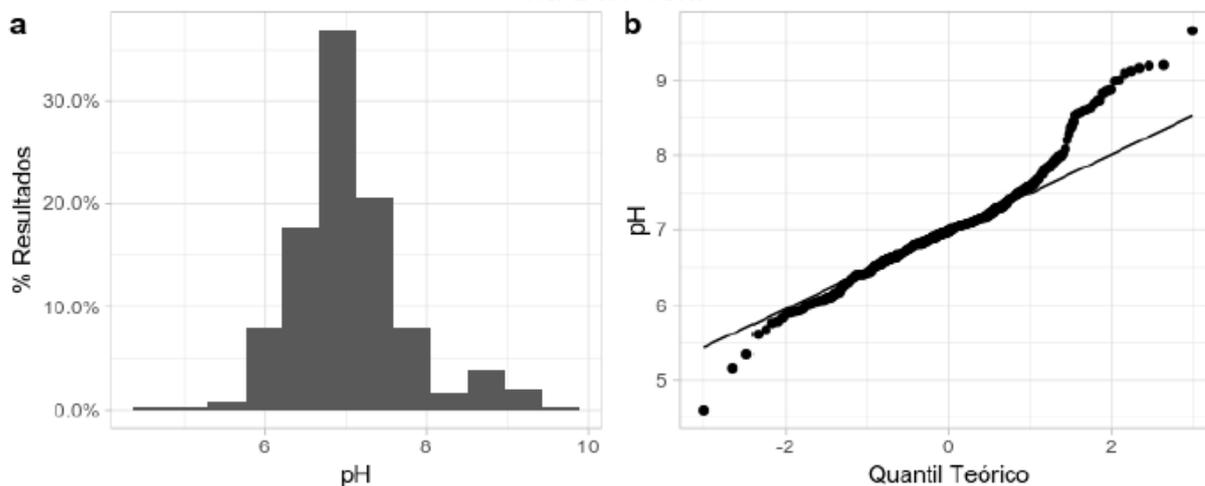
Fonte: Elaborada pelo autor.

Os dados transformados foram novamente avaliados graficamente em relação à aderência a normal e os resultados demonstraram melhora em relação às distribuições originais. Os gráficos dos resultados das transformações podem ser observados no Apêndice B.

A análise visual das variáveis individualmente apontou uma inadequação na transformação sugerida pela técnica *Box-Cox* no pH (que já representa uma

concentração do ion H^+ em escala logarítmica negativa). A Figura 16, mostra a distribuição e o gráfico *quantil-quantil* da variável pH.

Figura 16 - Distribuição e gráfico quanti-quantil de pH sem a transformação sugerida na Box-Cox.



Fonte: Elaborada pelo autor.

É possível notar que um conjunto de dados com valores maiores do que 8, especialmente em pontos no reservatório, criam um pico secundário na distribuição que alteram os valores de lambda. Ocorre que a transformação sugerida pelo método de *Box-Cox* não altera essa característica. Portanto, com base na análise gráfica, optou-se por não realizar transformação na variável pH.

5.2.2.2 Programa de Produtividade Pesqueira

Para a extração dos parâmetros de estatística descritiva para esse conjunto de dados, os resultados que indicavam concentrações iguais a zero foram removidos do conjunto, evitando erro na interpretação. O conjunto de dados não contém dados censurados nos resultados.

Foram realizadas 15 campanhas de campo entre junho de 2007 e dezembro de 2010, com a análise laboratorial de variáveis físico, químicas e biológicas da qualidade da água, em 13 pontos de monitoramento no rio Uruguai e tributários da região. No entanto, foi realizada seleção dos pontos RPF, UCX, URC, ULH que estão localizados em ambientes também monitorados pelo programa de Qualidade da Água. Da mesma forma, as variáveis TA, Tur, ST, OD, pH, NT, NO₃, PT, DQO, CoF, CoT do programa de Produtividade Pesqueira foram utilizadas uma vez que

coincidiavam com as do programa de monitoramento de Qualidade da Água. No caso do programa de Produtividade Pesqueira, apenas o período anterior ao fechamento da barragem foi utilizado.

A Tabela 15 mostra o valor médio das variáveis de qualidade da água para cada um dos pontos selecionados para a comparação.

Tabela 15 - Valores médios das variáveis de qualidade da água para os pontos no monitoramento reportado por Dal Magro et. al.

Ponto	TA	pH	OD	DQO	PT	NO3	NT	ST	Tur	CoT	CoF
RPF	19,5	7,4	7,5	26,5	0,877	0,95	1,89	102,1	11,1	2852,9	277,3
RUCX	18,7	7,3	8,2	26,1	0,674	0,80	2,07	111,7	8,3	1124,6	182,1
ULH	19,7	7,3	7,6	30,5	0,378	0,90	1,55	118,3	10,3	710,1	261,8
URC	20,0	7,2	7,8	8,9	0,454	0,85	1,87	100,0	6,2	765,6	318,4

Fonte: Dal Magro et al. (2015)

Os parâmetros de estatística descritiva do conjunto de dados analisados, com os 4 pontos de interesse e as variáveis coincidentes nos dois programas, podem ser observados na Tabela 16.

Tabela 16 - Parâmetros das distribuições das variáveis de qualidade da água de Dal Magro et al.

Variável	Amostras	Mínimo	Máximo	Média ± IC (95%)	Mediana	Desvio Padrão	Assimetria	Curto-se
TA	56	8,9	27,1	19,4 ± 1,25	19,6	4,67	-0,35	-0,83
Tur	56	2,36	65,02	8,98 ± 2,36	7,6	8,84	4,53	25,99
ST	56	26	298	108, ± 16,9	90	63,23	1,14	0,52
OD	56	4,63	18,5	7,77 ± 0,59	7,57	2,23	1,94	7,52
pH	56	4,95	9,7	7,28 ± 0,17	7,33	0,66	-0,28	4,24
NT	56	0,17	4,67	1,84 ± 0,29	1,71	1,11	0,66	-0,27
NO3	56	0,12	2,19	0,87 ± 0,11	0,87	0,42	0,64	0,80
PT	50	0,06	4,67	0,58 ± 0,20	0,24	0,76	3,27	14,25
DQO	54	0,14	156,36	22,7 ± 8,75	11,85	32,7	2,75	7,09
CoF	56	1,61	1609	259 ± 106	102	396	2,10	3,78
CoT	56	9	24000	1363 ± 921	500	3440	5,31	31,02

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os dados descritos nesta seção serão utilizados para comparação de amostras para avaliação de possíveis impactos à qualidade da água relacionados à formação do reservatório.

5.3 ANÁLISE DAS CARGAS NO RESERVATÓRIO

As cargas são calculadas com base na multiplicação das vazões e concentrações dos elementos de interesse, e o sistema pode ser representado conforme a Figura 7.

Importante considerar que nem todos os tributários de montante do reservatório são monitorados, o que pode resultar em erro na estimativa de entrada. No caso da vazão, ignorando-se perdas por evaporação, uso e infiltração, foi estimado que durante os meses de campanha, uma média de 115 m³/s entram no reservatório sem que se tenha estimativa das concentrações, e por conseguinte, das cargas.

As vazões médias para o período correspondente à realização das análises pelo Laboratório B, nas datas coincidentes com o do monitoramento de qualidade da água (após o fechamento da barragem), podem ser vistas na Tabela 17. A mesma tabela apresenta as concentrações médias das variáveis de qualidade da água de interesse em cada ponto de entrada e saída no monitoramento nesse mesmo período.

Tabela 17 - Vazão e concentrações médias de Nitrogênio Total, Fósforo Total e Cloretos nos pontos de controle de carga.

Ponto	Vazão Média [m ³ /s]	Nitrogênio Total [mg/L]	Fósforo Total [mg/L]	Cloretos [mg/L]
U1M	1214,3	1,5	0,05	1,4
T1M	7,1	3,9	0,14	3,3
T2M	44,4	2,2	0,07	1,7
T3M	97,5	1,6	0,05	1,9
T4M	5,1	1,4	0,05	1,3
T5M	2,8	1,1	0,06	1,0
T6M	3,1	2,4	0,12	1,9
T7M	3,0	1,9	0,15	2,7
U5J	1480,0	1,5	0,05	1,3

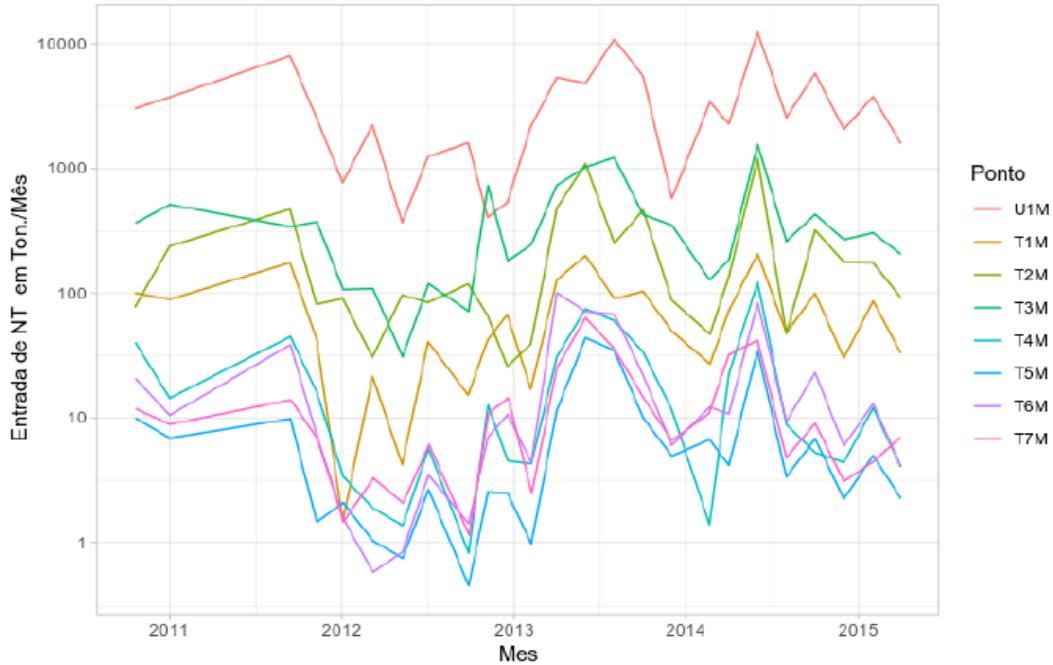
Fonte: Elaborada pelo autor.

Lembrando que o cálculo das cargas de saída foi realizado considerando as concentrações do U5J para as variáveis de qualidade da água e a soma das vazões turbinadas e vertidas do aproveitamento hidrelétrico. Além disso, a campanha imediatamente após fechamento foi desconsiderada.

A Figura 17 mostra as diversas cargas de Nitrogênio para cada ponto de monitoramento de qualidade da água, que seriam as entradas do sistema. Os

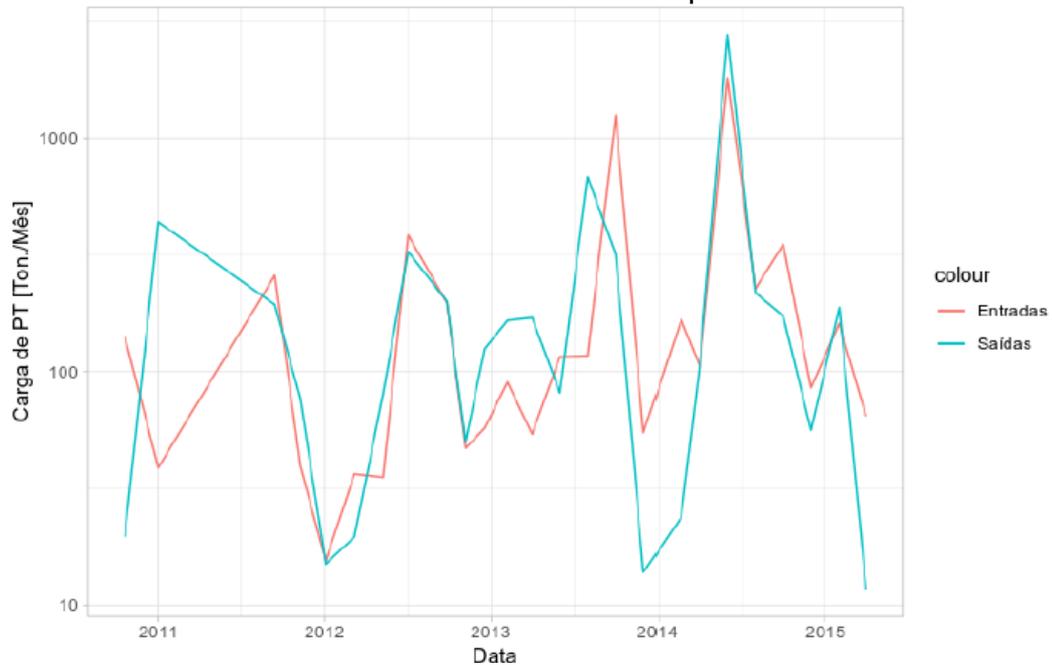
valores de carga das entradas foram somados e comparados com a saída a cada campanha.

Figura 17 - Série temporal com cargas de entrada de Nitrogênio Total a montante do reservatório de Foz do Chapecó.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 18 - Série temporal de saídas e entradas de carga de Fósforo Total no reservatório de Foz do Chapecó.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 18 mostra a linha de tempo da carga do elemento Fósforo na entrada e saída do sistema.

Apesar da lacuna a respeito da informação das cargas não monitoradas na entrada do sistema, é possível utilizar os dados disponíveis para avaliar a importância relativa das contribuições de entrada em cada curso d'água monitorado.

A Tabela 18 mostra o resumo das cargas de entrada e saída para cada uma das variáveis de interesse e os respectivos percentuais de contribuição de cargas na entrada do sistema. Lembrando que a saída é única para efeitos do cálculo da carga.

Tabela 18 - Resumo de entradas e saídas das cargas de NT, PT e Cl no reservatório da UHE Foz do Chapecó, com a importância relativa de cada entrada.

Variáveis	Sumário			Percentuais de Entrada							
	Entradas [T/mês]	Saídas [T/mês]	Diferenças [T/mês]	U1M [%]	T1M [%]	T2M [%]	T3M [%]	T4M [%]	T5M [%]	T6M [%]	T7M [%]
Nitrogênio Total	4302	5702	1400	79,1	2,0	5,7	11,8	0,5	0,2	0,4	0,4
Fósforo Total	236	261	25	81,7	2,4	3,9	9,3	0,4	0,4	0,9	1,0
Cloretos	5154	5267	113	82,7	1,3	3,8	11,0	0,3	0,1	0,3	0,4

Fonte: Elaborada pelo autor.

Como é possível notar, aproximadamente 80% das cargas de Nitrogênio Total, Fósforo Total e Cloretos é proveniente das contribuições de montante no rio Uruguai. Na sequência o rio Passo Fundo (T3M) e Irani (T2M) com percentagens aproximadas de 10 e 5% respectivamente.

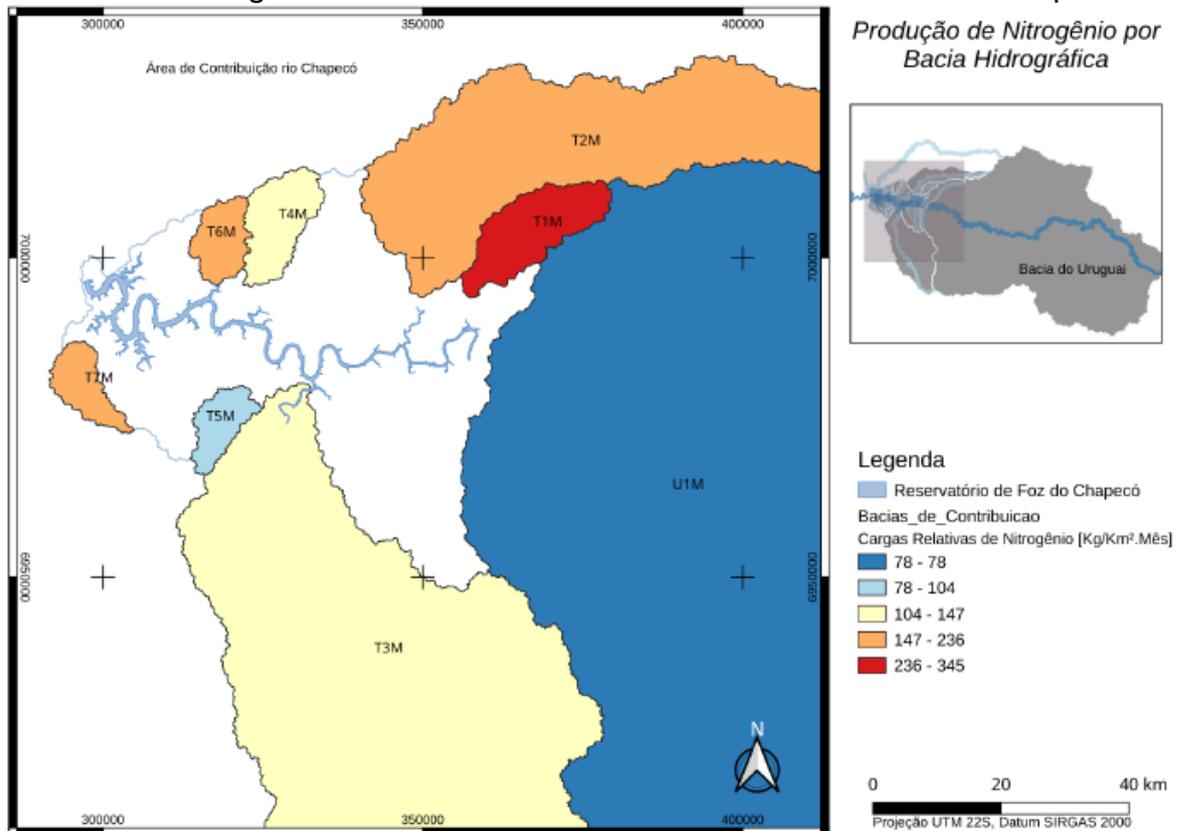
Os resultados demonstram que a quantidade de Nitrogênio, Fósforo e Cloretos é maior na saída do reservatório do que na entrada. Essa diferença corrobora a constatação de que existem entradas não monitoradas, com contribuições importantes para o sistema, especialmente nitrogênio, o que já havia sido mencionado acima.

A produção de Nitrogênio Total, Fósforo Total e Cloretos nas bacias hidrográficas foi dimensionada dividindo as cargas pelas áreas de contribuição.

Em função das diferenças extremas entre os tamanhos de bacias, os mapas produzidos mostram apenas parte das áreas das contribuições de montante do U1M, T2M e T3M.

A Figura 19 mostra a produção de Nitrogênio Total nas bacias monitoradas. No caso do Nitrogênio é possível notar que o tributário T1M (Ariranha) possui a maior produção, chegando a 345 Kg/Km² por mês. Contrastando com a contribuição de montante do rio Uruguai, onde a geração não chega a 80 kg/Km².mês.

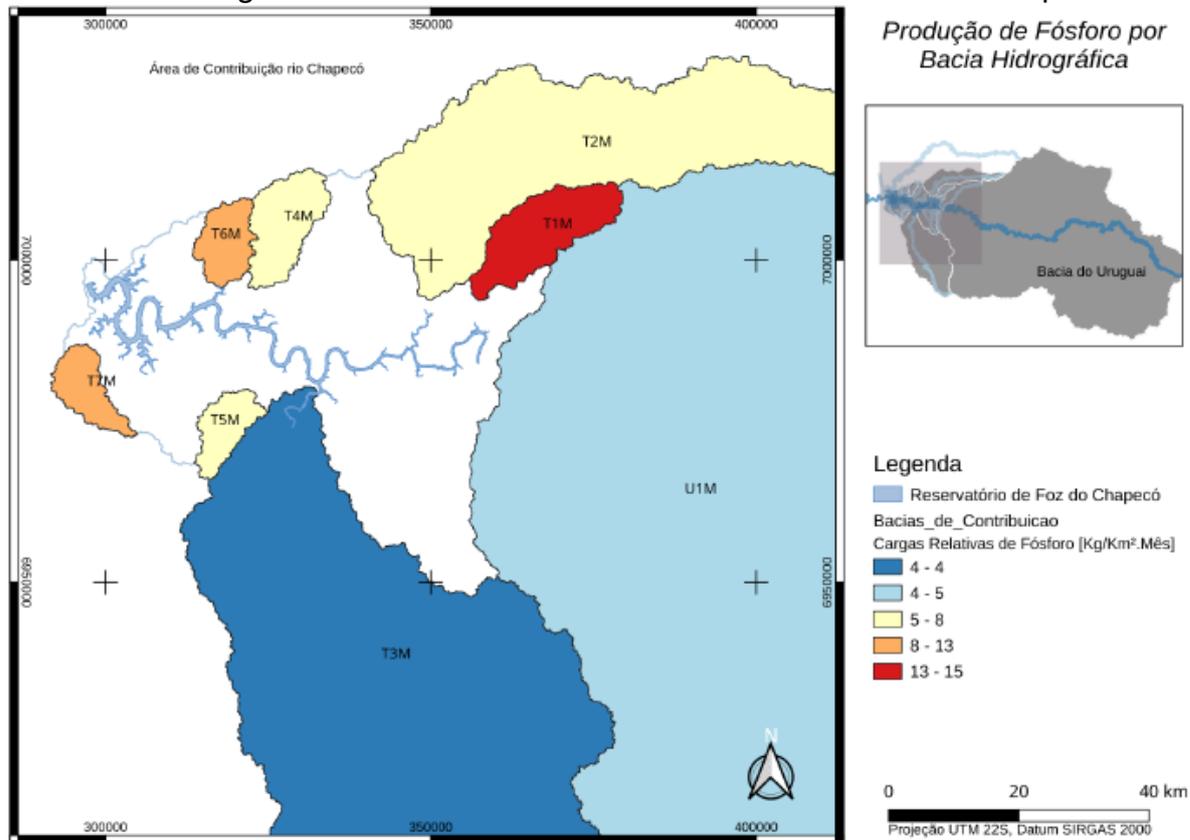
Figura 19 - Mapa com as cargas específicas de Nitrogênio Total produzidas por área da bacia hidrográfica de montante do reservatório da UHE Foz do Chapecó.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 20 mostra a produção de Fósforo Total nas bacias monitoradas. Assim, como no Nitrogênio, o tributário T1M (Ariranha) possui a maior produção de Fósforo dentre as bacias monitoradas, chegando a 13 Kg/Km² por mês. A bacia do rio Passo Fundo (T3M) tem a menor contribuição entre na rede de monitoramento, com geração 3,5 kg/Km².mês, de Fósforo.

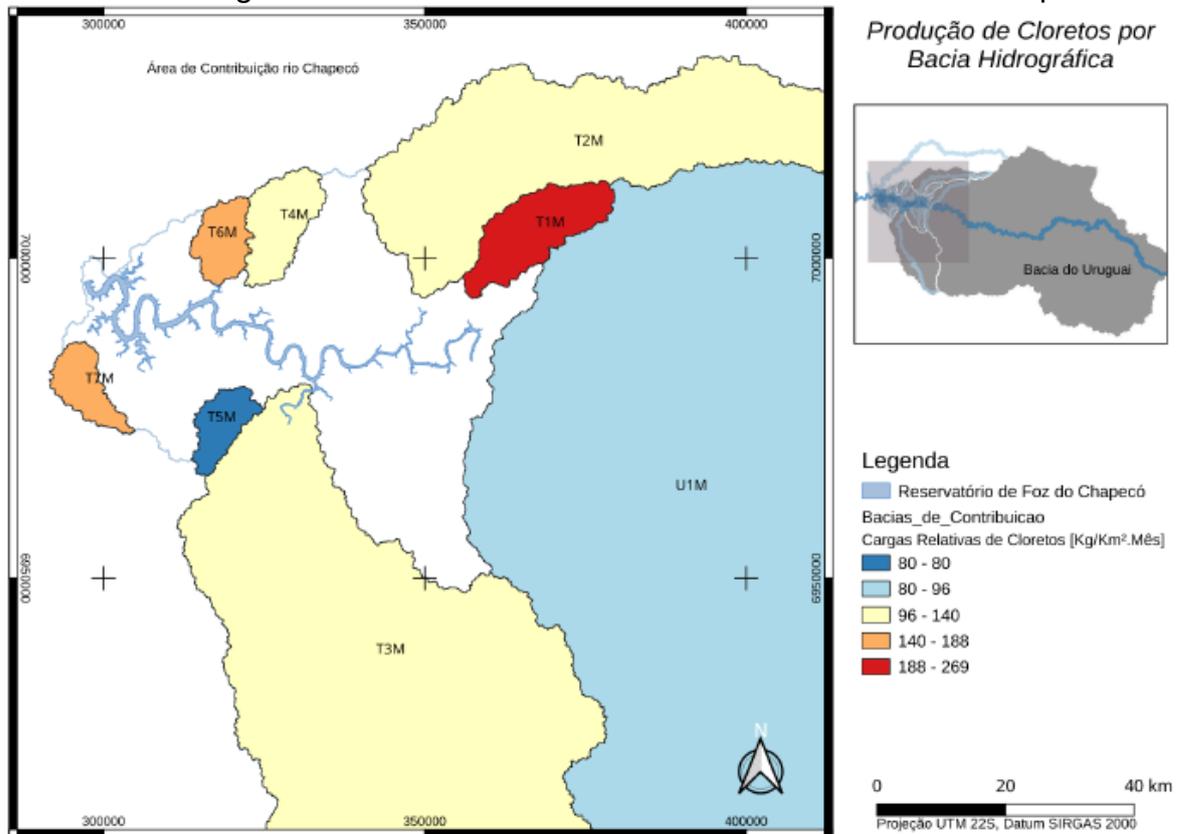
Figura 20 - Mapa com as cargas específicas de Fósforo Total produzidas por área da bacia hidrográfica de montante do reservatório da UHE Foz do Chapecó.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 21 mostra a produção de Cloretos nas bacias de montante do reservatório. Novamente o tributário T1M (Ariranha) possui a maior produção dentre as bacias monitoradas, chegando a 268 Kg/Km² por mês. A bacia do rio Tigre (T5M) tem a menor contribuição entre na rede de monitoramento, com geração 80 kg/Km².mês, de Cloretos.

Figura 21 - Mapa com as cargas específicas de Cloretos produzidas por área da bacia hidrográfica de montante do reservatório da UHE Foz do Chapecó



Fonte: Elaborada pelo autor.

A análise das bacias mostra a existência de um padrão dos elementos avaliados, especialmente em relação às contribuições dos pontos T1M, T6M e T7M, que têm altos níveis de produção de Nitrogênio, Fósforo e Cloretos.

5.4 ANÁLISE EXPLORATÓRIA MULTIVARIADA

Após a descrição dos dados e dimensionamento das cargas do reservatório, foram avaliadas as relações entre variáveis do Programa de Qualidade de Água do empreendimento, bem como as similaridades entre os pontos de monitoramento.

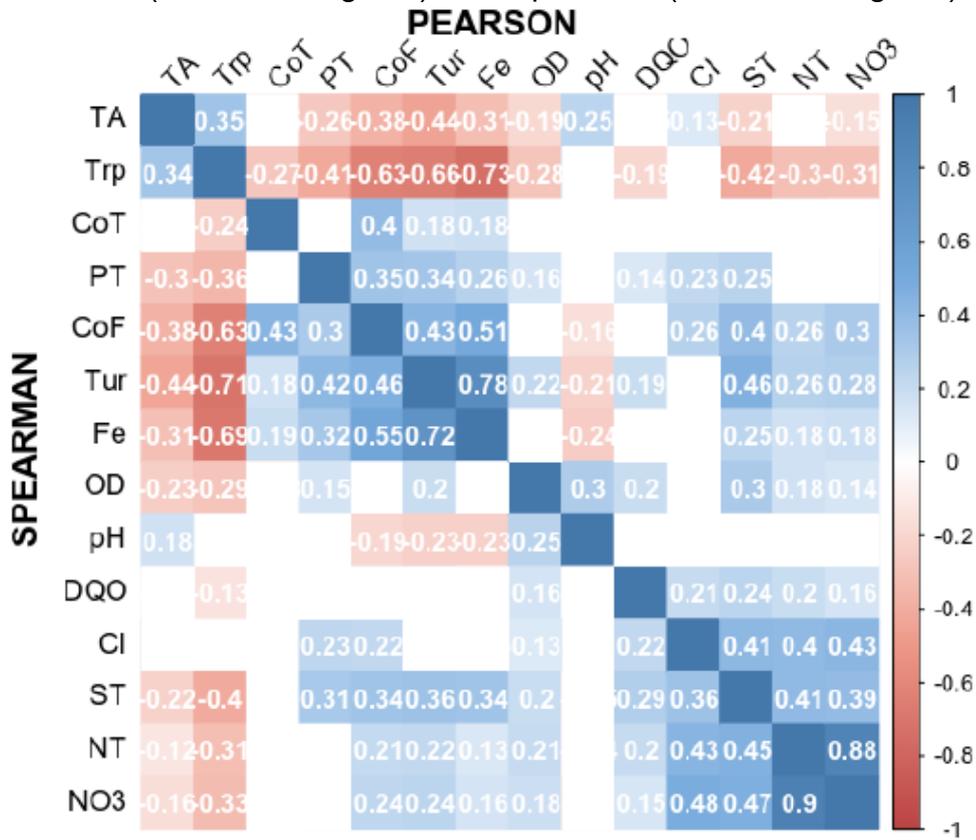
5.4.1 Correlação

As variáveis de qualidade da água foram testadas em pares para avaliar a correlação entre elas. Neste caso, foram utilizadas as correlações paramétricas de Pearson e não-paramétrica de Spearman. Os dados usados são de todos os pontos

da rede amostral, com exceção ao tributário Chapecó (T8J) e o período está limitado a posterior ao fechamento da barragem.

Para aplicação dos métodos de Pearson e Spearman, foi utilizado o conjunto de dados transformados segundo *Box-Cox* (Tabela 14) e com valores censurados substituídos por metade do limite de detecção. O resultado do cálculo da correlação nos métodos de Pearson e Spearman podem ser observados na Figura 22.

Figura 22 - Correlação entre variáveis de qualidade da água pelos métodos de Pearson (acima da diagonal) e de Spearman (abaixo da diagonal).



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 22 mostra a correlação de Spearman no triângulo inferior a diagonal e, na parte superior a correlação de Pearson. Nas técnicas o nível de significância (valor-p) definido foi de 5% e está representado nas células coloridas. As variáveis foram agrupadas em *clusters* para facilitar a identificação dos grupos. Existe semelhança nos resultados, com TA e Trp representando um agrupamento com correlação negativa entre as demais variáveis. Outros dois agrupamentos com correlação positiva formados por DQO, ST, Cl, NT e Fe e outro com PT, CoF, Tur e Fe, em ambos os métodos. Ainda, nota-se correlação positiva entre NT e NO3.

5.4.2 PCA

Para os dados do programa de monitoramento de qualidade da água de Foz do Chapecó, o resultado do KMO foi 0,75¹, o que indica adequação mediana, mas suficiente para aplicação da análise. Para o teste de Bartlett, o valor-p foi menor do que 2E-16, o que indica que há correlações suficientes entre as variáveis para que se realize a análise.

Para a definição da quantidade de fatores a serem retidos na análise, foi utilizado o critério da raiz latente, que tem como base a necessidade de que um fator explique a variância de, ao menos, uma variável. Por esse critério ficou estabelecido que devem ser mantidos 4 fatores. A tabela 16 mostra o autovalor, a proporção de variância explicada por cada fator e a variância acumulada.

Tabela 19 - Sumário da importância dos fatores na aplicação do PCA nas variáveis de qualidade da água.

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8
Autovalor	2,14	1,41	1,19	1,07	0,95	0,94	0,83	0,78
Proporção de Variância	0,33	0,14	0,10	0,08	0,06	0,06	0,05	0,04
Proporção Cumulativa	0,33	0,47	0,57	0,65	0,72	0,78	0,83	0,87

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 19 mostra os 8 fatores mais importantes na análise. Como é possível notar, com a retenção de 4 fatores 65% da variância do conjunto de dados é explicada.

A análise de cada um dos fatores retidos mostra as cargas das variáveis. Com base no número de observações é possível avaliar quais as cargas significativas em cada fator. De acordo com Hair et al. (2009), cargas fatoriais significantes para o tamanho dessa amostra de qualidade da água variam entre 0,30 (amostra de tamanho 300) e 0,35 (amostra de 250). Para que a análise englobasse todas as variáveis de qualidade da água nos fatores retidos, para a variável Fósforo Total o limite de 0,27 foi utilizado.

Os fatores que foram selecionados e as cargas de cada uma das variáveis podem ser observadas na Tabela 20.

¹Orientações do resultado da KMO: 0,80 ou acima, admirável; 0,70 ou acima, mediano; 0,60 ou acima, medíocre; 0,50 ou acima, ruim; e abaixo de 0,50, inaceitável (HAIR et al., 2009).

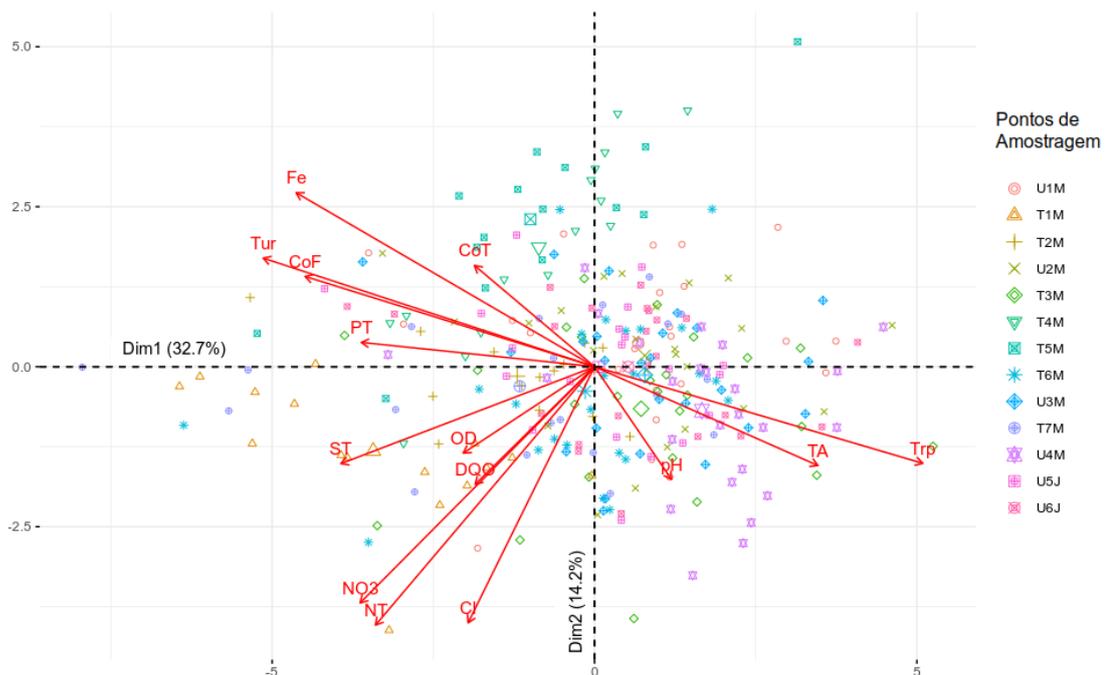
Tabela 20 - Cargas das variáveis nos fatores retidos no PCA.

Variáveis		PC1	PC2	PC3	PC4
TA	Temperatura da Água	0,26	-0,18	0,18	-0,43
Tur	Turbidez	-0,39	0,19	-0,11	0,11
Trp	Transparência	0,38	-0,17	0,06	0,07
ST	Sólidos Totais	-0,30	-0,17	-0,02	-0,09
OD	Oxigênio Dissolvido	-0,15	-0,15	-0,60	0,01
pH	Potencial Hidrogeniônico	0,09	-0,20	-0,46	-0,46
Cl	Cloretos	-0,15	-0,46	0,19	-0,33
Fe	Ferro	-0,35	0,31	0,02	0,01
NT	Nitrogênio Total	-0,26	-0,46	0,17	0,22
NO3	Nitrato	-0,27	-0,42	0,25	0,25
PT	Fósforo Total	-0,27	0,04	-0,15	-0,27
DQO	Dem. Química de Oxigênio	-0,14	-0,21	-0,30	0,01
CoF	Coliformes Fecais	-0,34	0,16	0,17	-0,26
CoT	Coliformes Totais	-0,14	0,18	0,34	-0,47

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 23 mostra a representação do PCA para os dois primeiros componentes, que explicam 47% da variabilidade, com as variáveis de qualidade da água. O gráfico identifica a amostra conforme o ponto de monitoramento em que foi coletada.

Figura 23 - Resultado do PCA, com as amostras de qualidade da água separadas por Pontos e as cargas para os fatores 1 e 2.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os resultados do PCA mostram que a primeira Componente, que explica 33% da variabilidade, é caracterizada pelas variáveis Turbidez (-), Transparência (+), Sólidos Totais (-), Ferro (-), Fósforo Total (-) e Coliformes Fecais (-). As maiores fontes de variabilidade desse fator são a Turbidez e a Transparência. Os dois indicadores têm relação com os sedimentos em suspensão, que são originados em função de ocorrência de chuvas nas bacias hidrográficas (carreamento de solo, processos erosivos etc.). A variável Ferro na água tem como origem a geologia local, o que explica sua variação de acordo com as chuvas. Em relação à Coliformes Fecais, eles têm origem ligada ao despejo de efluentes sanitários, e industriais (laticínios, curtumes, abatedouros e frigoríficos) essas atividades podem ser influenciadas também pelas chuvas, que carrega os resíduos quando não há controle e tratamento devidamente realizado. O Fósforo Total tem origem natural ligada às rochas, ao carreamento do solo, à decomposição de matéria orgânica e à chuva, e origem antrópica relacionada ao lançamento de esgotos, detergentes, fertilizantes e pesticidas – que são influenciadas pela ocorrência de chuvas. Portanto, é possível concluir que a 1ª Componente da PCA mostre a influência das chuvas nas bacias e por conseguinte das diferentes vazões nos processos ligados à qualidade da água.

A 2ª Componente, que explica 14% da variância, representa as variáveis Cloretos, Nitrogênio Total e Nitratos (todos com cargas negativas em relação ao eixo). Nitrato e Nitrogênio Total têm origem natural em função da fixação pela troca entre água e atmosfera. Os dois elementos também podem ter origem antrópica, devido lançamento de esgotos, efluentes industriais e insumos agrícolas. Cloretos podem ter origem na formação rochosa, mas também está presente no esgoto sanitário. A presença desses três elementos no Fator 2 indicam que a estrutura subjacente ligada a ele seja a presença de atividades antrópicas nas bacias de drenagem, especialmente despejo de efluentes urbanos e criação de animais.

A 3ª Componente, que explica 10% da variabilidade, representa as variáveis oxigênio dissolvido, pH e DQO (cargas negativas em relação ao eixo). O Oxigênio dissolvido na água é importante em vários processos no ambiente aquático, e está associado a elementos como temperatura, pressão e produção primária. O pH é uma variável que pode se alterar em razão da produtividade primária do ecossistema. Em densidades elevadas, o processo de fotossíntese é intensificado, aumentando a demanda por CO₂ da água e, conseqüentemente alterando o pH (ARRUDA et al., 2014, p. 89). O DQO mede a quantidade de oxigênio necessária

para a estabilização da matéria orgânica ocorrida por processos químicos e microbianos aeróbicos. A alteração de DQO, nesse caso, pode ter relação com o crescimento de matéria orgânica durante a produção primária. Assim, é possível inferir que a 3ª Componente descreva a influência dos processos químicos e biológicos ocorridos nos corpos d'água, como a fotossíntese - diretamente relacionados à produção primária (ARRUDA et al., 2014; ESTEVES, 1988).

A 4ª Componente, com 8% da variância, representa de forma significativa as variáveis Temperatura da Água e Coliformes Totais (além do pH que também está presente na 3ª Componente). A mudança da temperatura ocorre devido a interação da água com a atmosfera e através da radiação. A temperatura, por sua vez, tem efeitos sobre a decomposição de materiais, que podem ser a origem da variação dos coliformes totais nessa componente. Assim, entende-se que a 4ª Componente representa a interação da atmosfera com a qualidade da água e suas consequências.

Após a avaliação das relações intrínsecas entre as variáveis de qualidade da água, é importante entender de que forma as localidades monitoradas se assemelham.

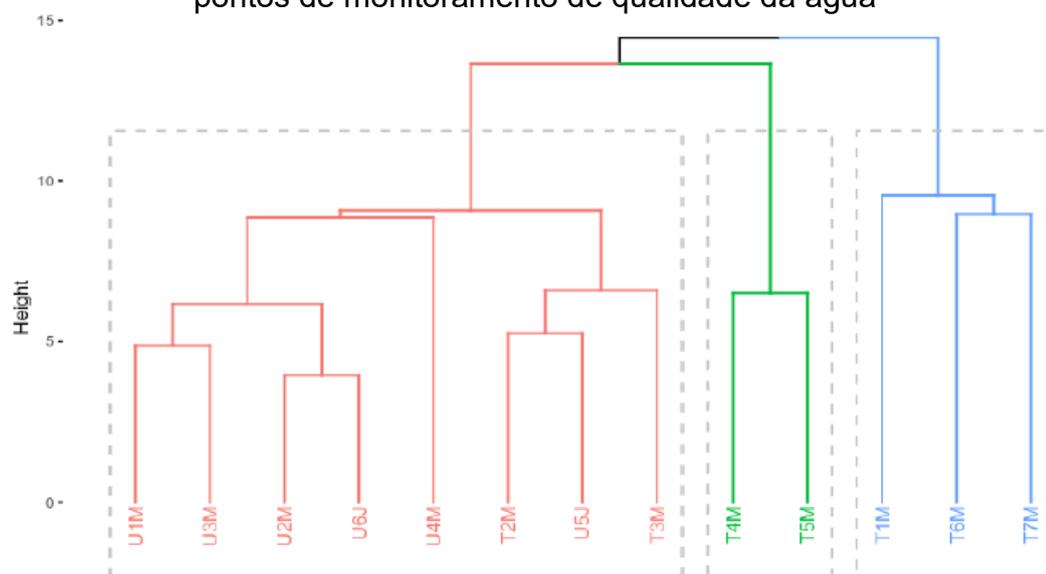
5.4.3 Agrupamento

A rede de monitoramento da qualidade da água do empreendimento tem o objetivo de representar diferentes ambientes aquáticos na área estudada. Há pontos de amostragem, no reservatório, montante e jusante da barragem. Para avaliar de que forma a qualidade da água se assemelham nesses pontos, foram aplicados testes de agrupamento com base nos fatores extraídos do PCA.

Duas técnicas de análise de agrupamento serão utilizadas: hierárquico e *k-means*. Para tanto, foram extraídos os escores dos 4 primeiros fatores criados pelo PCA para cada amostra coletada e os dados de todas as campanhas foram vinculados ao respectivo ponto de monitoramento.

O primeiro teste aplicado foi agrupamento hierárquico. O método de cálculo da distância escolhido foi o Euclidiano e o método de agrupamento Ward. A Figura 24 mostra o resultado da aplicação do agrupamento hierárquico para os pontos de monitoramento.

Figura 24 - Dendrograma do resultado da aplicação do agrupamento hierárquico nos pontos de monitoramento de qualidade da água



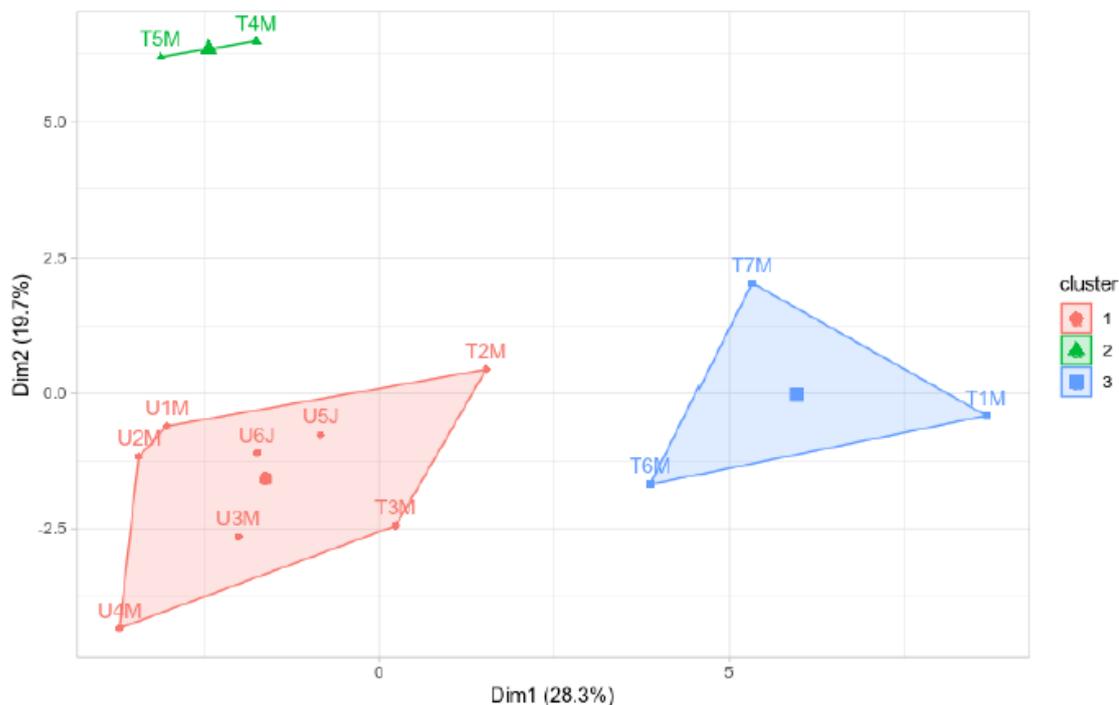
Fonte: Elaborada pelo autor.

Como é possível notar, existe uma distância considerável entre 3 agrupamentos, que parecem refletir a configuração natural do ambiente monitorado.

Para a aplicação do *K-means* é necessário previamente estabelecer o número de agrupamentos a serem formados pelo método. Conforme análise do agrupamento hierárquico, foi estabelecido que seriam 3 grupos a serem formados.

O resultado da aplicação do *K-means* para as duas mais importantes dimensões avaliadas (correspondendo a 48% da variância), nos dados de qualidade da água podem ser observados na Figura 25.

Figura 25 - Resultado da aplicação do K-means aos dados de qualidade da água para os dois principais eixos.

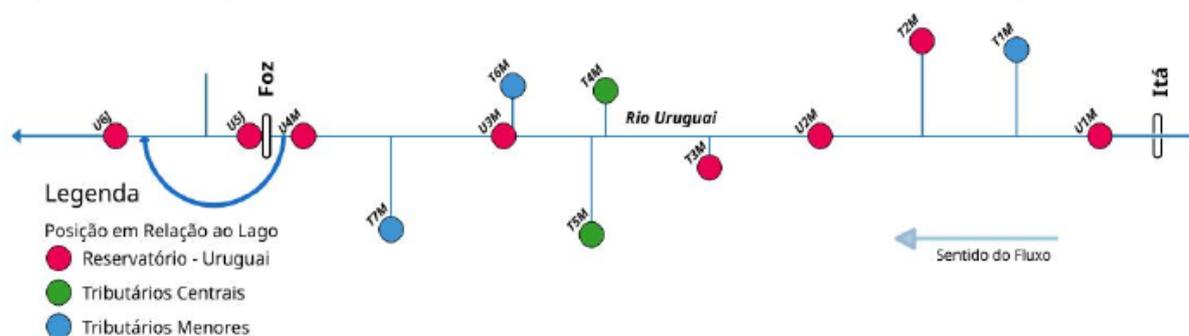


Fonte: Elaborada pelo autor.

Como se nota nas Figuras 24 e 25, as duas técnicas convergem para a mesma solução, o que reforça a existência de agrupamento de localidades na malha amostral.

A Figura 26 mostra um diagrama simplificado da área, indicando a posição relativa dos pontos e o agrupamento em que foi incorporado.

Figura 26 - Diagrama unifilar indicando os pontos e seus respectivos agrupamentos.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os grupos formados com a técnica de agrupamento foram identificados com nomes que descrevem os ambientes neles representados.

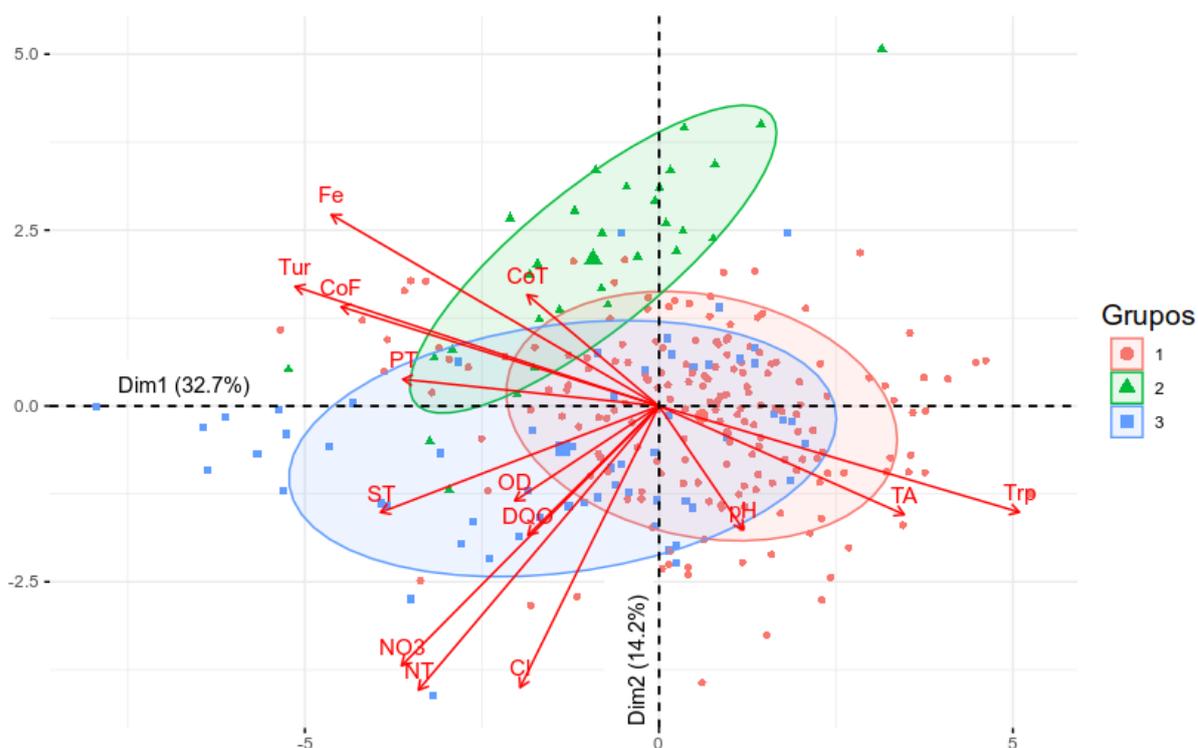
O grupo Reservatório - Uruguai conta com todos os pontos do reservatório (na cota 265m), exceto o T6M (rio Lamedor), além dos pontos dos principais tributários a montante da barragem (T3M e T2M). Os pontos caracterizam o fluxo principal de vazão que passa pelo sistema. O ponto T6M, apesar de se encontrar na mesma cota que o de operação do reservatório, está localizado nas proximidades da foz do rio Lamedor. Essa configuração morfológica originada pela formação do reservatório restringe o fluxo de água originária do Uruguai e aumenta a influência do tributário na qualidade de água daquele ponto.

Os pontos de amostragem nos tributários T4M e T5M, rios Tigre e dos Índios, representam a porção média da bacia de contribuição incremental do reservatório e apresentam propriedades de qualidade da água semelhantes, com características de ambientes mais conservados.

Os pontos identificados como “Tributários Menores” agrupam os pontos T1M, T6M e T7M, respectivamente rios Ariranha, Lamedor e Bonito. Esses rios têm como característica comum pequenas bacias de contribuição, localizadas a montante e contribuintes do reservatório de Foz do Chapecó. A qualidade da água nessas bacias apresenta sinais de degradação, o que pode ser justificado pela ocupação do solo. No caso dos pontos T1M e T6M, possivelmente associados as contribuições de atividades de criação animal e no caso de T7M em função do lançamento de efluentes urbanos da cidade de Alpestre.

Para avaliar o resultado da aplicação do agrupamento, as amostras foram identificadas de acordo com os grupos formados nas técnicas de *clusters*. A Figura 27 mostra os dois primeiros fatores do PCA com os pontos de monitoramento agrupados de acordo com o *K-means* e Agrupamento Hierárquico.

Figura 27 - PCA com as amostras agrupadas de acordo com as técnicas de *clusters*.



Fonte: Elaborada pelo autor.

As elipses abrangem 69% das amostras em cada grupo, o que representa a porcentagem referente a um desvio padrão em distribuições normais.

Como é possível notar, os grupos se apresentam relativamente bem separados, com os pontos do grupo “Uruguai – Reservatório” posicionados a direita em relação aos grupos “Tributários Centrais” e “Tributários Menores” da PC1. Essa componente representa o efeito das vazões na qualidade da água, portanto seria lógico que, dadas as diferentes dimensões, que em pequenas bacias a qualidade da água se comportasse de forma diferente das grandes bacias.

Na PC2, que representa as variáveis ligadas à efluentes urbanos e matéria orgânica na água, é possível notar a separação entre os grupos Tributários Centrais e Tributários Menores (grupos 2 e 3). A diferente forma de ocupação dessas bacias explicaria a diferença identificada nessa componente.

Com base na identificação desses padrões geográficos, é possível verificar se há diferenças significativas nas variáveis de qualidade de água monitoradas, a ser realizada por meio de testes de hipótese.

5.5 HIPÓTESES A RESPEITO DA QUALIDADE DA ÁGUA

5.5.1 Alterações na qualidade da água em função da localização do Ponto de Amostragem

Para avaliação de possíveis alterações nos parâmetros de qualidade da água em função da posição geográfica do ponto na rede amostral, foram usadas as informações extraídas da análise de agrupamento, que apontou 3 regiões distintas na área de estudo. O Quadro 7 mostra os grupos e respectivos pontos formados pela análise de agrupamento.

Quadro 7 - Grupos de localidades na rede amostral de Foz do Chapecó.

Grupo	Ponto de QA	Identificação
1	U1M, U2M, U3M, U4M, U5J, U6J, T2M, T3M	Uruguai - Reservatório
2	T4M e T5M	Tributários Centrais
3	T1M, T6M e T7M	Tributários Menores

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os valores-p dos testes de hipótese com grupos de pontos formados pela análise de agrupamento podem ser vistos na Tabela 21.

Tabela 21 - Avaliação das diferenças na qualidade da água em função da posição do ponto de amostragem.

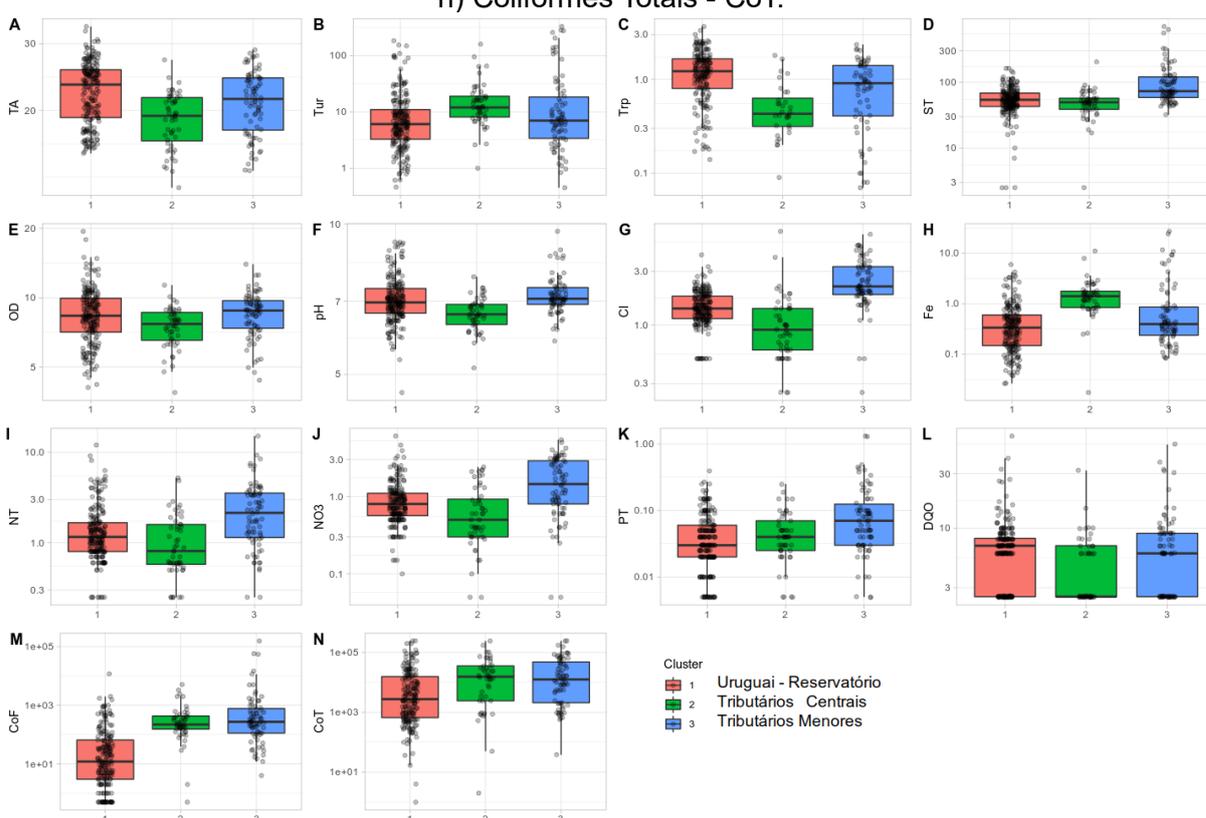
Variáveis	Censurado	Peto-Peto	<i>Kruskal-Wallis</i>	<i>PostHoc</i>
TA	N	1,6E-06	2,5E-07	(1,3);2
Tur	N	7,2E-07	1,0E-05	(1,3);2
Trp	N	1,5E-08	1,2E-09	1;2;3
ST	S	6,7E-16	3,5E-12	(1,2);3
OD	N	5,6E-03	2,6E-03	(1,3);2
pH	N	1,7E-06	4,3E-07	(1,3);2
Cl	S	0,0E+00	1,9E-22	1;2;3
Fe	N	0,0E+00	1,3E-14	1;2;3
NT	S	8,0E-09	9,4E-08	1;2;3
NO3	S	5,8E-11	2,5E-09	1;2;3
PT	S	8,0E-07	6,0E-06	(1,2);3
DQO	S	6,7E-03	4,0E-03	(1,3);2
CoF	S	0,0E+00	2,4E-25	1;(2,3)
CoT	S	1,9E-07	7,4E-07	1;(2,3)

Fonte: Elaborada pelo autor.

As variáveis com diferenças significativas em relação à localização estão em negrito e as células sombreadas em cinza indicam qual o teste mais adequado para o conjunto de dados, levando em consideração a existência ou não de valores censurados. Os testes *posthoc* aplicados (Dunn e Nemenyi) convergiram na indicação de quais os ambientes podem ser separados ou agrupados.

A Figura 28 mostra o resultado das variáveis em que ficaram constatadas diferenças significativas na comparação dos grupos. Como é possível notar na Figura, todas as variáveis de qualidade da água apresentaram diferenças significativas quando os ambientes de amostragem são comparados.

Figura 28 - Boxplots dos grupos de localidades dos pontos de amostragem para as variáveis de qualidade da água com diferença significativa: a) Temperatura – TA; b) Turbidez – Tur; c) Transparência – Trp; d) Sólidos Totais – ST; e) Oxigênio Dissolvido - OD; f) pH; g) Cloretos - Cl; h) Ferro Total – Fe; i) Nitrogênio Total – NT; j) Nitrato - NO₃; k) Fósforo Total – PT; l) Demanda Química de Oxigênio – DQO; m) Coliformes Fecais – CoF; e n) Coliformes Totais - CoT.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Quando se avalia Coliformes Totais e Fecais é possível notar que o ambiente “Uruguai – Reservatório” tem comportamento distinto, mostrando a provável influência da diminuição das velocidades em função da formação do

reservatório. Essa diminuição na velocidade, aumenta a transparência e permite que a radiação solar reduza a quantidade de coliformes neste grupo, quando comparados com os outros. Boa parte das variáveis que compõem a PC1 (Tur, ST, Fe, PT e COF), indicadora de processos físicos desencadeados pela vazão, são menores nesse grupo. A Transparência, por sua vez, menor, em função da redução das velocidades em boa parte dos pontos de monitoramento.

O ambiente “Tributários Centrais”, cujos pontos são T4M e T5M, apresenta Cloretos, Nitrogênio Total e Nitratos significativamente menores do que os outros grupos. Essas variáveis são indicativos de contribuição por atividades de origem humana nesses ambientes e correspondem à 2ª Componente do PCA. É possível concluir, portanto, que essas bacias de drenagem possuem maior integridade do ambiente natural. Por outro lado, o ambiente “Tributários Menores” apresentam valores mais elevados das variáveis indicadoras de lançamento por atividades antrópicas, quando comparadas aos demais grupos.

Portanto, é possível concluir que existem três diferentes compartimentos de água superficial a serem analisados na área de estudo. Esses compartimentos apresentam características distintas, se comparados com os outros, corroborando os resultados dos grupos formados na análise de agrupamento.

5.5.2 Alterações na qualidade da água no interior do reservatório

A alteração do regime hídrico gera uma série de consequências para a qualidade da água. O reservatório é o local onde essa influência pode ser avaliada de forma objetiva. A rede de monitoramento da UHE de Foz do Chapecó possui 4 pontos localizados no corpo do rio Uruguai, especificamente no trecho afetado pela formação do reservatório.

Os testes foram realizados eliminando os dados anteriores ao fechamento da barragem. Os resultados são apresentados na Tabela 22.

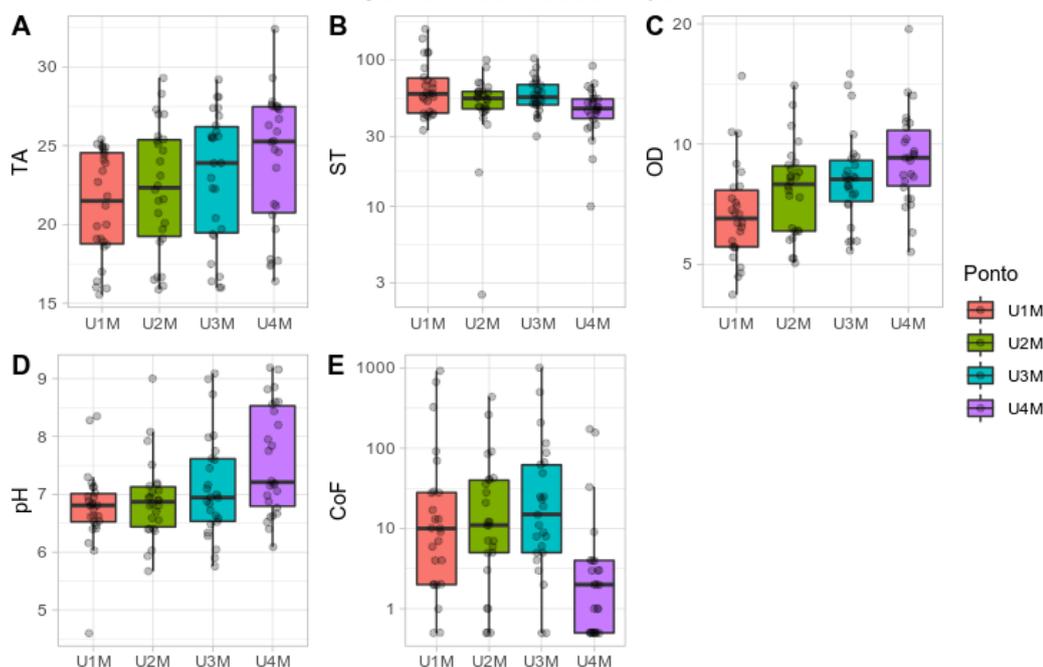
Tabela 22 - Resultado do teste para avaliar diferenças nos pontos de monitoramento no interior do reservatório.

Variável	Peto-Peto	Kruskal-Wallis	PostHoc
TA	0,0337	0,0350	1;4
Tur	0,3866	0,3677	
Trp	0,3545	0,3688	
ST	0,0303	0,0247	1;4
OD	0,0003	0,0006	1;4
pH	0,0060	0,0139	(1,2);4
Cl	0,4581	0,5102	
Fe	0,0738	0,0647	
NT	0,7062	0,7067	
NO3	0,2560	0,2630	
PT	0,8704	0,8562	
DQO	0,7206	0,7249	
CoF	0,0010	0,0005	(1,2,3);4
CoT	0,3508	0,3649	

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na coluna representando o teste *posthoc*, os números de 1 a 4, representam os pontos de U1M a U4M, respectivamente. Os pontos agrupados são representados entre parênteses e os distintos são separados por ponto e vírgula.

Figura 29 - Boxplots dos resultados das variáveis de qualidade da água nos pontos de reservatório com diferenças significativas, segundo o teste de hipótese. Sendo: a) Temperatura – TA; b) Sólidos Totais – ST; c) Oxigênio Dissolvido - OD; e) pH; f) Coliformes Fecais – CoF.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os gráficos *boxplot* mostrados na Figura 29 demonstram como se comportam as variáveis com diferenças significativas nos pontos do reservatório. Como é possível observar, existe uma tendência na elevação da temperatura, OD e pH e queda nos sólidos totais à medida que a água percorre o trecho. O comportamento de coliformes fecais não é contínuo. Há um pequeno acréscimo nas medianas, sem diferenças significativas entre os pontos U1M a U3M e no ponto U4M um decréscimo brusco no NMP.

As mudanças nas variáveis de qualidade da água podem ser explicadas pela alteração do regime hídrico. A formação do reservatório reduz as velocidades no trecho em função do aumento da seção de escoamento. Essa redução na velocidade, adicionada ao aumento da superfície de contato, permite que a interação entre a água e a atmosfera ocorra de forma mais efetiva, aumentando a temperatura à medida que o reservatório se aproxima da barragem.

A redução nas concentrações de sólidos totais também guarda relação com a alteração da velocidade no trecho. Com a redução da velocidade ocasionado pela barragem, o regime laminar de escoamento permite a decantação das partículas mais densas diminuindo as concentrações de sólidos na água.

A variação de OD e pH crescem à medida que o monitoramento se aproxima da barragem, o que pode indicar um aumento na produção primária, que ocasiona o incremento de OD e pH (ARRUDA et al., 2014). Outro fator a ser considerado em relação ao aumento do oxigênio é que o aumento da superfície de contato entre a água e a atmosfera que permite a formação uma pista de vento, por consequência de ondas no reservatório, e com isso intensifica a reoxigenação da água.

Por fim, a concentração de coliformes fecais apresenta queda brusca no último trecho de reservatório. De acordo com Von Sperling (2005), a cinética de decaimento bacteriano tem relação com a alteração de pH, temperatura e radiação solar entre outras. Esses fatores podem explicar a diminuição da contagem de coliformes fecais no trecho mais a jusante do reservatório.

5.5.3 Alterações na qualidade da água em função do período hidrológico

Após a constatação da existência e da delimitação de diferenças sazonais na vazão no rio Uruguai nas proximidades da barragem, é possível avaliar, individualmente quais são as variáveis de qualidade da água afetadas por essa

forçante. A questão a ser respondida, portanto, é se há alterações nas variáveis de qualidade da água em função do período hidrológico em que foram coletadas.

Os resultados da aplicação do teste podem ser observados na Tabela 23. As variáveis TA, Tur, Trp, OD, Fe, NO₃, DQO e CoF apresentam diferenças significativas quando comparadas as amostras coletadas no período de cheias e estiagem.

Tabela 23 - Resultados do teste de hipótese a respeito do efeito do período hidrológico.

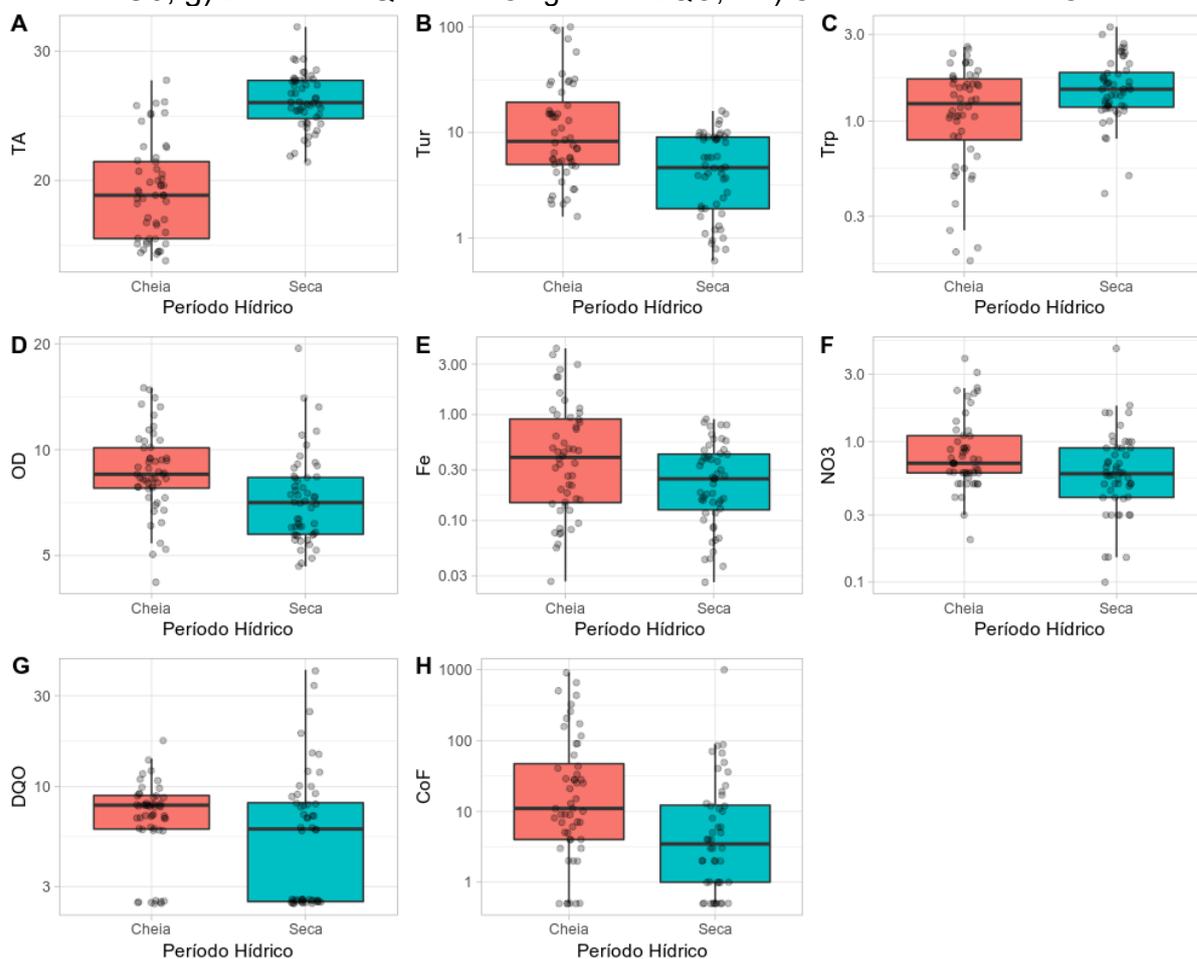
	Censurados	Peto & Peto	Wilcoxon
TA	0,00%	1,11E-16	3,10E-14
Tur	0,00%	1,34E-04	1,76E-04
Trp	0,00%	1,85E-02	1,94E-02
ST	1,24%	9,17E-02	9,33E-02
OD	0,00%	1,72E-04	2,33E-04
pH	0,00%	4,43E-01	4,45E-01
Cl	12,69%	1,52E-01	1,41E-01
Fe	0,00%	2,56E-02	2,66E-02
NT	4,23%	1,19E-01	1,20E-01
NO ₃	2,24%	1,50E-02	1,54E-02
PT	13,93%	6,48E-02	5,65E-02
DQO	39,30%	3,06E-02	3,13E-02
CoF	7,96%	1,78E-03	1,94E-03
CoT	0,50%	4,78E-01	4,81E-01

Fonte: Elaborada pelo autor.

As células sombreadas da Tabela 23 indicam o teste mais adequado para comparação, em função da existência ou não de dados censurados.

Os gráficos *boxplot* mostrados na Figura 30 permitem avaliar essas diferenças e o efeito que essa diferença exerce em cada variável de qualidade da água.

Figura 30 - Boxplots das variáveis de qualidade da água com diferença significativa nos períodos de cheia e seca. Sendo: a) Temperatura – TA; b) Turbidez – Tur; c) Transparência – Trp; d) Oxigênio Dissolvido - OD; e) Ferro Total – Fe; f) Nitrato - NO₃; g) Demanda Química Oxigênio – DQO; e h) Coliformes Fecais – CoF.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Conforme a Figura 30, nos períodos de cheia, as variáveis Tur, OD, Fe, NO₃, DQO e CoF são maiores que nos períodos de estiagem. Ocorre o oposto nas variáveis TA e Trp. Essas alterações mostram os processos hidrológicos, como a diluição e a suspensão de sólidos em ação. A alteração da temperatura, tem relação com a temperatura do ar, no período de cheias, mas também com a velocidade em que o líquido percorre o reservatório. É natural que se a velocidade for menor, como no caso do período de estiagem, a incidência solar tenha maior efeito na temperatura da água. A turbidez é maior no período de cheias, reflete a ação da suspensão de partículas pela maior velocidade de escoamento das águas. Por esse mesmo princípio, a transparência da água do reservatório é maior à medida que as velocidades de escoamento são menores, o que permite a sedimentação, maior visibilidade e maior alcance dos raios solares.

O processo de oxigenação da água, tem relação com a temperatura e a agitação, que facilita a troca de gases entre a atmosfera e o líquido. Isso explica as concentrações mais elevadas no período de cheias.

As concentrações de Ferro têm origem na formação do solo da região ou de atividades industriais que manipulam o elemento – o que não parece ser o caso dessa região. Assim, as maiores concentrações estão ligadas nesse caso ao carreamento do elemento disponível no solo da região, e isso ocorrem com maior intensidade nos períodos chuvosos.

Os nitratos podem aumentar com os esgotos domésticos e insumos agrícolas, o que mostra também uma relação com o aumento do número de coliformes fecais.

Apesar do percentual de dados censurados, o teste de hipótese indicou diferença significativa nos grupos do período de cheias e seca de DQO. A variação desse indicador na água deve-se principalmente a despejos de origem industrial. O aumento dos valores medianos em período de cheias indica que está ocorrendo carreamento de efluentes nas bacias a montante.

Os Coliformes Fecais têm origem ligada ao despejo de efluentes sanitários e industriais. A bacia hidrográfica possui diversas cidades de pequeno e médio porte com taxas de saneamento baixas. Além disso há bacias com criação de suínos e aves extensiva, o que colabora com o carreamento de coliformes para os cursos d'água da região. Esse processo se intensifica com altas taxas de pluviosidade.

5.5.4 Alterações na qualidade da água em função da implantação da Barragem

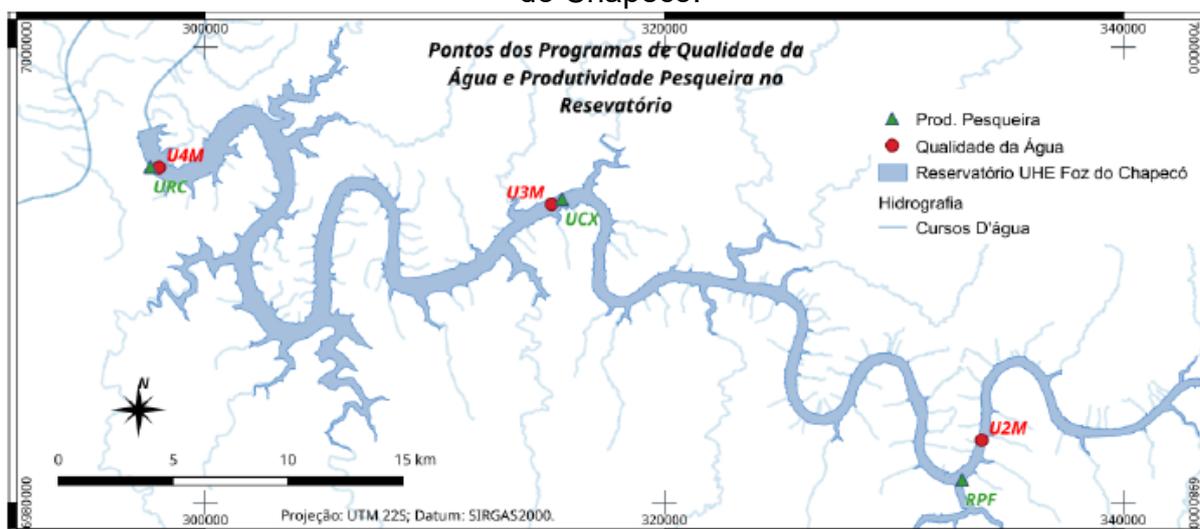
A implantação da barragem criou um reservatório para acúmulo de água visando a geração de energia. As características físicas do reservatório foram descritas na seção 4.1. Por sua vez, a formação do reservatório alterou o regime hídrico de parte do rio Uruguai e alguns dos tributários de lótico para lântico. Assim, o que se pretende avaliar é se a alteração do regime hídrico provocou alteração na qualidade de água nos pontos de amostragem.

A avaliação foi realizada tendo como base dados de qualidade de água de período anterior e posterior à implantação da barragem. Contudo, conforme mencionado na seção 5.1, os dados do programa de qualidade da água do

empreendimento estão inconsistentes. Como alternativa, os dados do programa de produtividade pesqueira (e reportado por DAL MAGRO et al., 2015) foram utilizados.

Os pontos utilizados para o teste estão localizados no trecho do reservatório (Figura 31) e as amostras forma agrupadas de acordo com o programa que fez a coleta, nas variáveis coincidentes entre os programas.

Figura 31 - Mapa com a posição dos pontos de monitoramento dos programas de Qualidade da Água e de Produtividade Pesqueira no trecho de reservatório de Foz do Chapecó.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os resultados dos testes de hipótese nos conjuntos de pontos dos programas de monitoramento de Qualidade da Água e Produtividade Pesqueira, podem ser observadas na Tabela 24.

Tabela 24 - Resultado do teste de hipótese para avaliar as variáveis de qualidade da água antes e depois da formação de reservatório.

	Censurados	Peto & Peto	Wilcoxon
TA	0,00%	1,08E-04	6,55E-05
Tur	0,00%	9,00E-01	9,01E-01
ST	1,66%	2,61E-12	2,02E-09
OD	0,00%	6,86E-02	6,33E-02
pH	0,00%	7,01E-02	7,69E-02
NT	8,31%	5,50E-03	9,02E-03
NO3	3,33%	1,32E-01	1,44E-01
PT	25,00%	0,00E+00	2,13E-15
DQO	45,00%	2,85E-05	7,91E-05
CoF	23,93%	4,41E-09	1,15E-07
CoT	0,00%	1,39E-04	9,24E-05

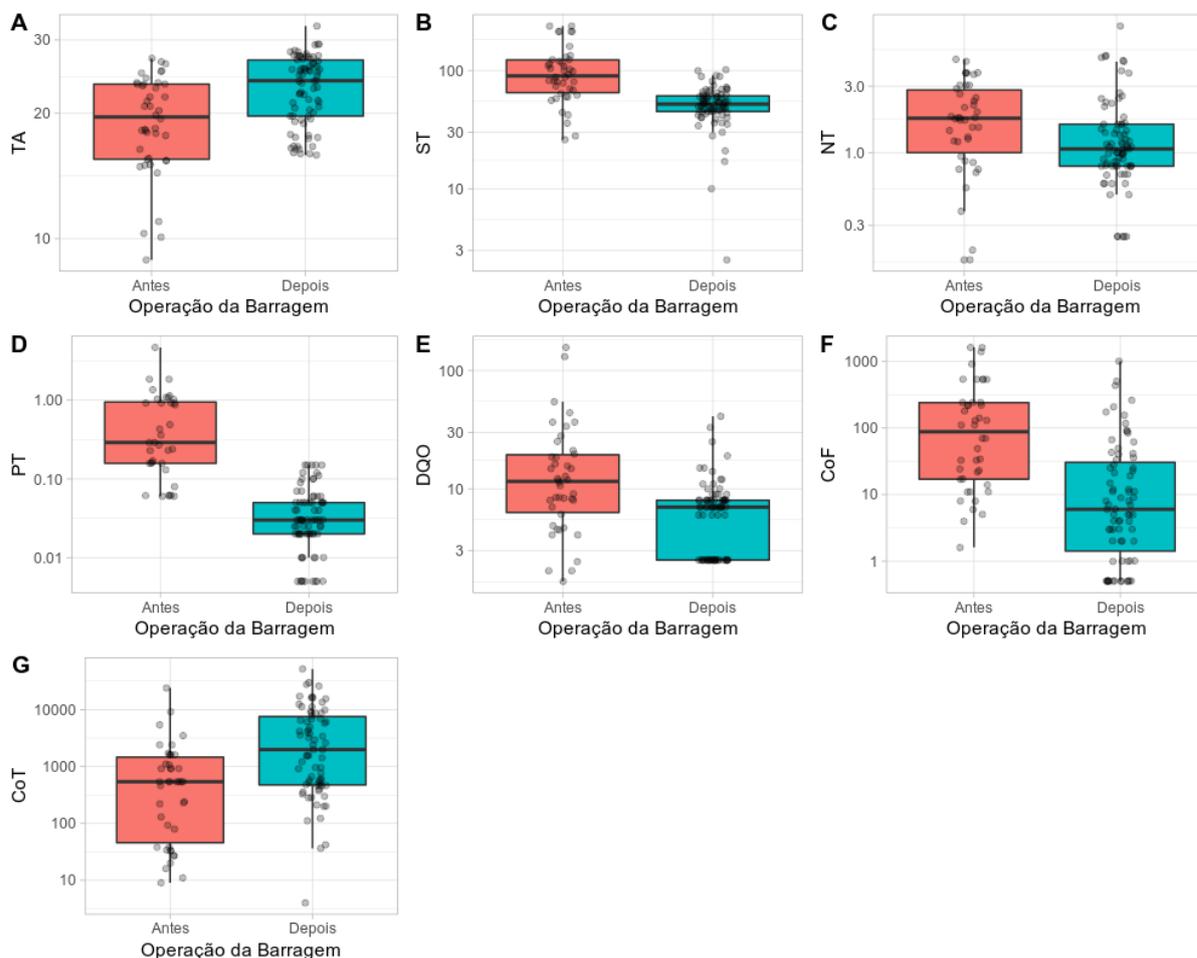
Fonte: Elaborada pelo autor.

Como é possível notar na Tabela 24, os dois testes foram aplicados a todas as variáveis coincidentes. No caso do valor-p do teste de hipótese ser menor do que 5%, os dados estão indicados em **negrito**. Além disso, como existem variáveis com dados com censura ou não, o resultado do teste mais adequado ao conjunto de dados é indicado com o **sombreamento (em cinza)** da célula da tabela.

Cabe destacar, ainda a respeito da Tabela 24, que o percentual de dados censurados se refere apenas às variáveis do programa de Qualidade da Água.

Como é possível notar, as variáveis TA, ST, NT, PT, DQO, CoF, CoT apresentam diferenças significativas quando comparadas as amostras coletadas no período anterior e posterior a operação da barragem. A Figura 32 mostra gráficos *boxplot* para as variáveis que apresentaram diferença significativa.

Figura 32 - Boxplots das diferenças entre variáveis de qualidade de água antes e depois da formação do reservatório de Foz do Chapecó. Sendo: a) Temperatura – TA; b) Sólidos Totais – ST; c) Nitrogênio Total – NT; d) Fósforo Total – PT; e) Demanda Química de de Oxigênio – DQO; f) Coliformes Fecais – CoF; e g) Coliformes Totais - CoT.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Como é possível observar, nas variáveis TA e CoT, os valores foram maiores após a instalação do reservatório. Já as variáveis ST, NT, PT, DQO e CoF os valores são menores após a operação da Usina.

A diferença em relação à temperatura tem conexão com o aumento do volume no trecho formado pelo reservatório, que reduz as velocidades de escoamento e permite troca de calor com a atmosfera de forma mais efetiva.

O aumento da seção transversal do rio e a consequente redução das velocidades de escoamento também é o fundamento para a redução nas concentrações de sólidos totais após a formação do reservatório, uma vez que permite que partículas de maior densidade sedimentem.

As variáveis Fósforo Total e Nitrogênio Total foram detectadas com valores menores no reservatório após a implantação. Esses são nutrientes para o crescimento de algas e macrófitas. A formação de reservatórios tem como consequência a eutrofização desses ambientes, em especial se há nutrientes disponíveis. Outra possibilidade em relação a redução das concentrações de Fósforo e Nitrogênio é a distribuição desses elementos na coluna d'água, especialmente na zona fótica.

O DQO é indicador de poluição industrial, a sua redução pode ter relação com a redução da velocidade e a possibilidade estabilização da matéria orgânica disponível por processos químicos e microbianos aeróbicos no reservatório.

Os Coliformes Fecais e Totais têm comportamento distintos. Os fecais sofrem uma queda a partir da implantação do reservatório. Essa redução pode ter relação com a fotodegradação das bactérias. Os Coliformes Totais, por sua vez, são provenientes da decomposição de matéria orgânica. A formação do reservatório alagou uma área extensa que teve parte da vegetação submersa. Esse processo desencadeia a degradação da matéria orgânica com a formação de coliformes totais, o que poderia explicar o aumento do índice após a implantação da barragem.

6 CONCLUSÃO

Em se tratando de um estudo de caso, as conclusões guardam restrições para aplicação geral, contudo permitem entender um pouco melhor alguns processos na implantação de empreendimentos hidrelétricos e seus impactos, além da dinâmica da água superficial na área de estudo.

Com base nos resultados foi possível constatar que os valores médios de vazão não foram afetados pela implantação das usinas de Itá e Foz do Chapecó. Por outro lado, houve mudanças nos dados extremos de vazão, com a amenização das curvas de permanência dos períodos estudados. Além disso, houve uma alteração na intensidade da sazonalidade.

Da análise das cargas de variáveis indicadoras de poluição antrópica e importantes para os processos biológicos no reservatório (NT, PT e CI), foi possível concluir que existem entradas não monitoradas no trecho, e que cerca de 80% das cargas que chegam ao reservatório nos pontos avaliados são originárias de Itá, seguida pelas cargas do rio Passo Fundo e Irani.

Em relação à qualidade da água foi possível constatar que existem diferenças significativas nas variáveis em função da localização do ponto de monitoramento. Apesar do pequeno tempo de residência do reservatório, algumas variáveis sofrem influência em função do local de sua amostragem. A sazonalidade hidrológica também afeta as variáveis de qualidade da água. Por fim, foi identificado que a implantação da usina, em especial a formação do reservatório, influenciou a qualidade da água no rio Uruguai a montante do barramento.

A avaliação dos impactos antrópicos na água superficial na área de influência da UHE de Foz do Chapecó é dinâmica e complexa. Não é possível atribuir a apenas um agente as mudanças identificadas na hidrologia e qualidade da água da região. Contudo o trabalho conseguiu identificar mudanças e apontou possíveis causas que devem ser investigadas com maior detalhamento em trabalhos futuros. A distribuição dos nutrientes na coluna d'água, o papel de tributários não monitorados para a qualidade da água no reservatório e os efeitos do trecho de vazão reduzida na qualidade da água permanecem como questões a serem respondidas.

A respeito da consistência dos dados de qualidade da água, foi possível observar a importância da escolha dos laboratórios e métodos para a realização das

análises. Essa etapa do trabalho deixou clara a necessidade de que a gestão ambiental do empreendimento realize esse tipo de avaliação continuamente, sob pena de que o esforço de coleta seja desperdiçado. Variáveis de importância para aferição das atividades biológicas (como clorofila-a e fluorescência) e avaliação das atividades antrópicas (como DBO e Nitrogênio Orgânico) não puderam ser avaliadas. A escolha do laboratório deve levar em consideração as metodologias analíticas e suas restrições (em especial quanto aos limites de detecção), além disso deve considerar os padrões ambientais do local, permitindo um acompanhamento das variáveis durante a vida útil do empreendimento.

Algumas recomendações adicionais a respeito dos resultados obtidos seriam a inclusão de um ponto de monitoramento de qualidade da água no rio Chalana, que drena grande parte da área urbana de Chapecó, e a medição de concentrações de nutrientes na coluna d'água para avaliar de que forma estão distribuídos no reservatório.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, S. M. Z.; CHIOSSI, P. A.; ALMEIDA, L. P.; ALMEIDA, L. P.; ALMEIDA, L. P. (2017). **Estudo das águas superficiais do rio ariranha e identificação das ciliar**, p. 111–118.

ALMEIDA, Daniel B et al. Diagramas unifilares e mapeamento das estações F, FD, P, Pr e barramentos das sub-bacias 70 A 74 no Rio Uruguai. XIII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, n. 51, p. 1 – 10, 2016.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION - APHA. (1998). **Standard Methods for Examination of Water and Wastewater**. In Standard Methods. Disponível em: <<https://doi.org/30M11/98>>. Acesso em: 27 fev. 2020.

ANDRADE, E. M.; ARAÚJO, L. F. P; ROSA, M. F.; DISNEY, W.; ALVES, A. B.; ANDRADE, E. M.; ALVES, A. B. **Seleção dos indicadores da qualidade das águas superficiais pelo emprego da análise multivariada**. Engenharia Agrícola, 27, p. 683–690, 2007.

ANTWEILER, R. C. **Evaluation of Statistical Treatments of Left-Censored Environmental Data Using Coincident Uncensored Data Sets**. II. Group Comparisons. Environmental Science and Technology, 49, p. 13439–13446, 2015.

ARRUDA, N. M. B.; ARRUDA, N. M. B. (2014). **Avaliação de variáveis de qualidade de água dos reservatórios das usinas hidrelétricas de Foz do Areia, Segredo e Caxias, como instrumento de gestão de bacias hidrográficas**. 227.

BARROS, A.M.L. **Modelagem da poluição pontual e difusa: Aplicação do modelo Moneris à bacia Hidrográfica do rio Ipojuca, Pernambuco**. 193 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.

BARTRAM, J.; BALANCE, R. (1996). **Water Quality Monitoring: A Practical Guide to the Design and Implementation of Freshwater Quality Studies and Monitoring Programmes**. In UNEP/WHO (Vol. 34). Disponível em: <<http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=buh&AN=17622159&site=ehost-live>>. Acesso em: 20 fev. 2020.

BEHMEL, S.; DAMOUR, M.; LUDWIG, R.; RODRIGUEZ, M. J. **Water quality monitoring strategies — A review and future perspectives**. Science of the Total Environment, 571, p. 1312–1329, 2016.

BILGIN, A. **An assessment of water quality in the Coruh Basin (Turkey) using multivariate statistical techniques**. Environmental Monitoring and Assessment, 187, 2015.

BOTTIN, J.; DAL MAGRO, J.; SOUZA-FRANCO, G. M.; MOCELIN, D. J. C. **Avaliação limnológica da microbacia do lajeado passo dos índios, Chapecó, SC**. Biológico, p. 31–39, 2007.

BRASIL, A. N. A. (2015). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: regiões hidrográficas brasileiras – Edição Especial.**

CALAZANS, G. M.; PINTO, C. C.; COSTA, E. P.; PERINI, A. F.; OLIVEIRA, S. C. **The use of multivariate statistical methods for optimization of the surface water quality network monitoring in the Paraopeba river basin, Brazil.** Environmental Monitoring and Assessment, 190, 2018.

CASTAMAN, M. N. (2014). Lajeado passo dos índios em Chapecó /SC: qualidade da água e uso do solo nas áreas de nascentes. UFFS.

CASTILLO, E. F.; GONZALES, W. F.; CORRALES, D. C.; LÓPEZ, I. D.; GUZMÁN HOYOS, M.; FIGUEROA, A.; CORRALES, J. C. **Alertas de calidad del agua basadas en análisis de agrupamiento en las cuencas de los ríos colombianos.** Sistemas y Telemática, 13, p. 9–26, 2015.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Significado ambiental e sanitário das variáveis de qualidade das águas e dos sedimentos e metodologias analíticas e de amostragem.** Qualidade Das Águas Interiores No Estado de São Paulo, 1(Série Relatórios), 44, 2009.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo.. **Guia Nacional de coleta e Preservação de amostras.** São Paulo: CETESB; Brasília: ANA, 2011.

CHRISTOFARO, Cristiano; LEÃO, Mônica M.D. D. **Tratamento de dados censurados em estudos ambientais.** Quimica Nova, v. 37, n. 1, p. 104 – 110, 2014.

DAL MAGRO, J.; BALDISSERA, R.; SCAPINELLO, J.; OLIVEIRA, M.; FRANCO, G. M.; OLIVEIRA, M.; FRANCO, G. M. (2015). **Variação espacial e sazonal de parâmetros físicos, químicos e microbiológicos do Rio Uruguai e tributários na área de influência da Usina Hidrelétrica Foz do Chapecó.**

DAL MAGRO, M. L. P.; RENK, A.; FRANCO, G. M. S. (2015). **Impactos Socioambientais da Implantação da Hidrelétrica Foz do Chapecó.**

DALZOCHIO, Thaís et al. **In situ monitoring of the Sinos River, southern Brazil: water quality parameters, biomarkers, and metal bioaccumulation in fish.** Environmental Science and Pollution Research, v. 25, n. 10, p. 9485 – 9500, 2018.

DIAMANTINI, E.; LUTZ, S. R.; MALLUCCI, S.; MAJONE, B.; MERZ, R.; BELLIN, A. **Driver detection of water quality trends in three large European river basins.** Science of the Total Environment, 612, p. 49–62, 2018.

DRH/SEMA-RS. (2007). Plano Estadual de Recursos Hídricos - Relatório Síntese da Fase A - Diagnóstico e Prognóstico Hídrico das Bacias Hidrográficas do Rio Grande do Sul. **Relatório Anual Sobre a Situação Dos Recursos Hídricos Do Estado Do Rio Grande Do Sul.**, 1–2. Retrieved from <http://www.sema.rs.gov.br/>

FREITAS, Mariana. **Avaliação de variáveis físicas e de qualidade das águas em reservatórios de usinas hidrelétricas de Minas Gerais para gestão das águas no Estado**. UFMG - Dissertação, p. 75, 2017.

EPE, & Energética, E. de P. (Brasil). (2018). **Balanco Energético Nacional 2018: Ano base 2017**.

ESDRAS, J.; ZANDAGBA, B.; ADANDEDJI, F. M.; LOKONON, B. E.; CHABI, A.; DAN, O.; MAMA, D. **Application Use of Water Quality Index (WQI) and Multivariate Analysis for Nokoué Lake Water Quality Assessment**. American Journal of Environmental Science and Engineering, 1, p. 117–127, 2017.

ESTEVEZ, F. A. Fundamentos de Limnologia 2a Edição. Interface, 2, p. 226, 1998. Disponível em: <<https://doi.org/10.1515/znc-1987-0514>>. Acesso em: 28 fev. 2020.

FARIA, Miguel Zerbini De et al. **The Foz do Chapecó Hydroelectric Power Plant**. In: CARDOSO, E. (Org.). Main Brazilian Dams III. CBDB: 2009. p. 151 – 175.

FERRARI, D. G.; SILVA, L. N. D. E. C. (2017). **Introdução a mineração de dados**. Editora Saraiva: São Paulo, 2017.

FRANÇA, M. S. (2009). Análise estatística multivariada dos dados de monitoramento de qualidade de água da Bacia do Alto Iguaçu: uma ferramenta para a gestão de recursos hídricos. 150.

FUNASA, F. N. de S.-. (2014). Manual de controle da qualidade da água para técnicos que trabalham em etas. Fundação Nacional de Saúde- FUNASA, 1 ed., 112. Disponível em: <<http://www.funasa.gov.br>>. Acesso em: 28 fev. 2020.

GODOY, Antonio Cesar et al. **Water Quality in a Reservoir used for Fish Farming in Cages in Winter and Summer Periods**. Water, Air, and Soil Pollution, v. 229, n. 3, 2018.

GRASS DEVELOPMENT TEAM. Geographic Resources Analysis Support System (GRASS GIS) Software, Version 7.2. Disponível em: <<http://grass.osgeo.org>>. 2017

GÜLER, Cüneyt et al. **Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data**. Hydrogeology Journal, v. 10, n. 4, p. 455 – 474, 2002.

HAIR JR.J. F.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E.; Tatham, R. L. (2009). **Análise Multivariada de Dados**. In Análise multivariada de dados.

HELSEL, D. R. Less than obvious: Statistical treatment of data below the detection limit. Environmental Science and Technology, 24, p. 1766–1774, 1990.

HELSEL, D. R. (2011). **Statistics for Censored Environmental Data Using Minitab® and R**: Second Edition. In Statistics for Censored Environmental Data Using Minitab® and R: Second Edition. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/9781118162729>>. Acesso em: 28 fev. 2020.

HELSEL, D. R.; HIRSCH, R. M. (2002). **Statistical Methods in Water Resources**. Disponível em: <<https://doi.org/10.2307/1269385>>. Acesso em: 28 fev. 2020.

HELSEL, D. R.; LEE, L. R. (2006). **Analysis of environmental data with nondetects, Statistical methods for censored environmental data**. ASA Workshop, (August), 30. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/9781118162729>>. Acesso em: 28 fev. 2020.

HOU, W.; SUN, S.; WANG, M.; LI, X.; ZHANG, N.; XIN, X.; JIA, R. **Assessing water quality of five typical reservoirs in lower reaches of Yellow River, China: Using a water quality index method**. Ecological Indicators, 61, p. 309–316, 2016.

Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis – IBAMA (2018). Processo Administrativo no 02001.002644/98-16. Usina Hidrelétrica Foz do Chapecó. Brasília.

JUNG, K. Y.; LEE, K. L.; IM, T. H.; LEE, I. J.; KIM, S.; HAN, K. Y.; AHN, J. M. **Evaluation of water quality for the Nakdong River watershed using multivariate analysis**. Environmental Technology and Innovation, 5, p. 67–82, 2016.

KAZI, T. G. et al. **Assessment of water quality of polluted lake using multivariate statistical techniques: A case study**. Ecotoxicology and Environmental Safety, v. 72, n. 2, p. 301 – 309, 2009.

KISI, O.; AY, M. **Comparison of Mann-Kendall and innovative trend method for water quality parameters of the Kizilirmak River, Turkey**. Journal of Hydrology, 513, p. 362–375, 2014.

KORKMAZ, S.; GOKSULUK, D.; ZARARSIZ, G. **MVN: An R package for assessing multivariate normality**. The R Journal, 6, p. 151–162, 2014.

KOVÁCS, J.; TANOS, P.; KORPONA, J.; SZÉKELY, I. K.; GONDÁR, K. **Analysis of Water Quality Data for Scientists. Water Quality Monitoring and Assessment**, 65, p. 94, 2015.

LEE, L. (2017). **NADA - Nondetects and Data Analysis for Environmental Data**. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/package=NADA>>. Acesso em: 28 fev. 2020.

LI, S.; BHATTARAI, R.; WANG, L.; COOKE, R. A.; MA, F.; KALITA, P. K. **Assessment of water quality in little Vermillion river watershed using principal component and nearest neighbor analyses**. Water Science and Technology: Water Supply, 15, p. 327–338, 2015.

LIVADA, I.; ASIMAKOPOULOS, D. N. **Individual seasonality index of rainfall regimes in Greece**. Climate Research, v. 28, n. 2, p. 155 – 161, 2005.

LIYAFU; YOU-GANWANG. **Statistical Tools for Analyzing Water Quality Data**. Water Quality Monitoring and Assessment, 602, p. 27, 2002.

MACHADO, M. T. DE S.; BAPTISTA, G. M. DE M. **Sensoriamento remoto como ferramenta de monitoramento da qualidade da água do Lago Paranoá (DF)**. Engenharia Sanitaria e Ambiental, 21, p. 357–365, 2016.

MEDEIROS, G. A.; DE LIMA TRESMONDI, A. C. C.; DE QUEIROZ, B. P. V.; FENGLER, F. H.; ROSA, A. H.; FIALHO, J. M.; RIBEIRO, A. I. **Water quality, pollutant loads, and multivariate analysis of the effects of sewage discharges into urban streams of Southeast Brazil**. Energy, Ecology and Environment, 2, p. 259–276, 2017.

NAGHETTINI, M.; PINTO, É. J. D. A. **Hidrologia Estatística**. Belo Horizonte: CPRM, 2007.

NATHAN, N. S.; SARAVANANE, R.; SUNDARARAJAN, T. **Spatial Variability of Ground Water Quality Using HCA, PCA and MANOVA at Lawspet, Puducherry in India**. Computational Water, Energy, and Environmental Engineering, 6, p. 243–268, 2017.

OLSEN, R. L.; CHAPPELL, R. W.; LOFTIS, J. C. **Water quality sample collection, data treatment and results presentation for principal components analysis - literature review and Illinois River watershed case study**. Water Research, 46, p. 3110–3122, 2012.

PIMENTA, A. M.; FURLANETTO, L. M.; ALBERTONI, E. F.; PALMA-SILVA, C. **Water quality in the lotic area of the Antas River before and after the construction of the Monte Claro hydroelectric plant, south Brazil**. Acta Limnologica Brasiliensia, 24, p. 314–325, 2012.

POFF, N. Le Roy et al. **Homogenization of regional river dynamics by dams and global biodiversity implications**. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, v. 104, n. 14, p. 5732 – 5737, 2007.

QGIS DEVELOPMENT TEAM. **QGIS Geographic Information System**. V 3.10. Disponível em: <<http://qgis.org>>. 2019

REIMANN, C.; FILZMOSER, P.; GARRETT, R. G.; DUTTER, R. (2015). **Statistical Data Analysis Explained Applied Environmental Statistics with R**. In CEUR Workshop Proceedings (Vol. 1542). Disponível em: <<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>>. Acesso em: 28 fev. 2020.

ROCHA, C. H. B.; SILVA, T. M., FREITAS, F. A. (2016). **Processos condicionantes de alterações em variáveis limnológicas: uma abordagem estatística na Represa de São Pedro, Juiz de Fora (MG)**. Engenharia Sanitaria e Ambiental. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1413-41520201600100113419>>. Acesso em: 28 fev. 2020.

SANTA CATARINA, S. (2006). **Plano estadual de recursos hídricos de Santa Catarina - PERH-SC**.

- SAURRAL, R. I.; BARROS, V. R.; LETTENMAIER, D. P. (2008). **Land use impact on the Uruguay River discharge**. *Geophysical Research Letters*, 35, p. 1–6, 2008.
- SERRANO BALDERAS, Eva Carmina. **Preprocessing and analysis of environmental data: Application to the water quality assessment of Mexican rivers**. 2017. 175 f. Université Montpellier, 2017.
- SHRESTHA, S.; KAZAMA, F. **Assessment of surface water quality using multivariate statistical techniques: A case study of the Fuji river basin, Japan**. *Environmental Modelling and Software*, v. 22, n. 4, p. 464 – 475, 2007.
- SHUMWAY, R. H.; AZARI, R. S.; KAYHANIAN, M. **Mean Water Quality Concentrations**. *Environmental Science & Technology*, v. 36, n. 15, p. 3345–3353, 2002.
- SOTOMAYOR, G.; HAMPEL, H.; VÁZQUEZ, R. F. **Water quality assessment with emphasis in parameter optimisation using pattern recognition methods and genetic algorithm**. *Water Research*, 130, p. 353–362, 2018.
- SOUZA, A., BERTOSSI, A. P. A., LASTORIA, G., SOUZA, A. DE, BERTOSSI, A. P. A., & LASTORIA, G. **Diagnóstico temporal e espacial da qualidade das águas superficiais do Córrego Bandeira, Campo Grande, MS**. *Revista Agro@Mambiente On-Line*, 9, p. 227, 2015.
- STANIMIROVA, I. **Practical approaches to principal component analysis for simultaneously dealing with missing and censored elements in chemical data**. *Analytica Chimica Acta*, 796, p. 27–37, 2013.
- STETS, E. G. et al. **Increasing chloride in rivers of the conterminous U.S. and linkages to potential corrosivity and lead action level exceedances in drinking water**. *Science of the Total Environment*, v. 613 – 614, p. 1498 – 1509, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.119>>.
- STROBL, R. O.; ROBILLARD, P. D. **Network design for water quality monitoring of surface freshwaters: A review**. *Journal of Environmental Management*, 87, p. 639–648, 2008.
- TABARI, H.; MAROFI, S.; AHMADI, M. **Long-term variations of water quality parameters in the Maroon River, Iran**. *Environmental Monitoring and Assessment*, 177, p. 273–287, 2011.
- TERNUS, R. Z. (2007). *Caracterização limnológica de afluentes da bacia do alto rio Uruguai – SC*. Universidade Comunitária Regional de Chapecó.
- TERNUS, R. Z.; SOUZA-FRANCO, G. M.; ANSELMINI, M. E. K.; MOCELLIN, D. J. C.; DAL MAGRO, J.; SOUZA-FRANCO, G. M.; DAL MAGRO, J. **Influence of urbanisation on water quality in the basin of the upper Uruguay River in western Santa Catarina, Brazil**. *Acta Limnologica Brasiliensia*, 23, p. 189–199, 2011.

TRINDADE, A. L. C. (2013). **Aplicação de técnicas estatísticas para avaliação de dados de monitoramento de qualidade das águas superficiais da porção mineira da Bacia do Rio São Francisco**, p. 1–181.

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

UN-WATER. (2018). NATURE-BASED SOLUTIONS FOR WATER World Water Assessment Programme United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. Sustainable Development Goals water and sanitation. Disponível em: <<https://www.unesco.org/open-access/>>. Acesso em: 28 fev. 2020.

VIANA, D. T. (2014). Análise do banco de dados de qualidade da água da UHE Nova Ponte/MG através da aplicação de ferramentas estatísticas. Universidade Federal de Minas Gerais.

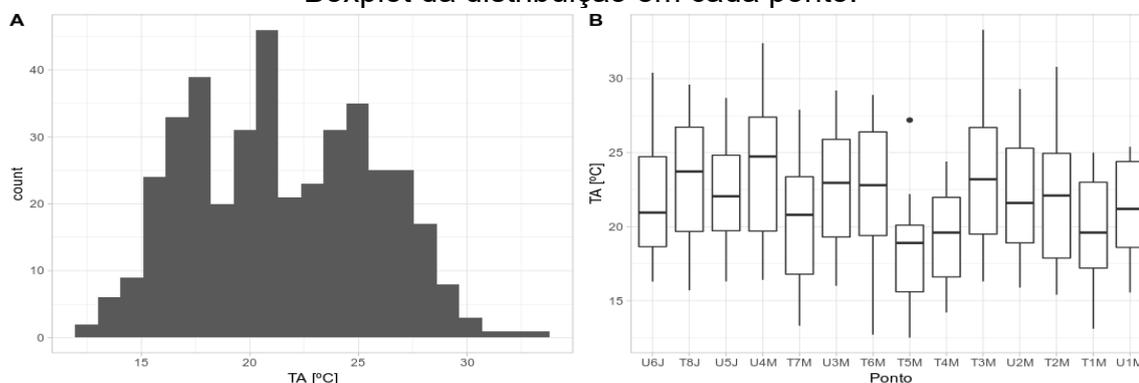
VILLA, M. E. C. D. **Variabilidade espacial e temporal do pH e do OD na superfície do reservatório Irai - PR**. 143 f. Tese – UFPR – S. Programa de Pós-Graduação em Geografia, 2016.

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

VON SPERLING, Marcos. **Estudos e modelagem de qualidade da água de rios**. 2. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2014.

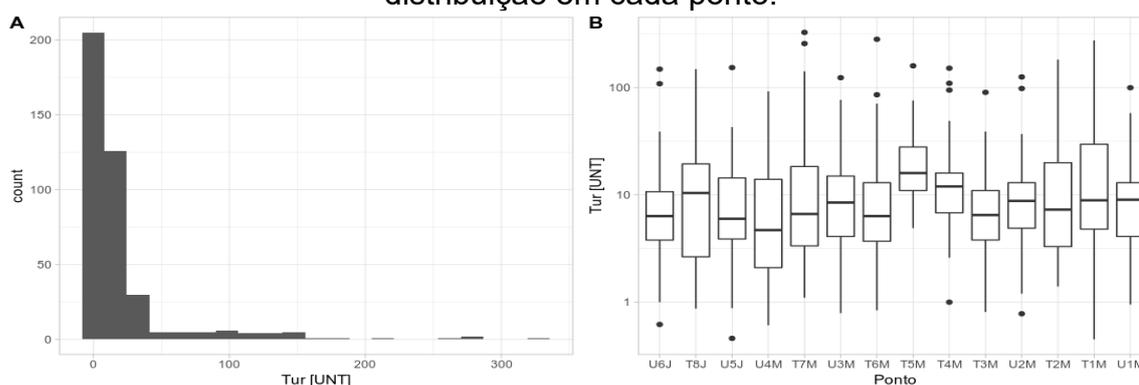
APÊNDICE A - Gráficos exploratórios das variáveis de qualidade da água

Figura A 1 - Gráficos da Temperatura da Água. (A) Histograma da Distribuição. (B) Boxplot da distribuição em cada ponto.



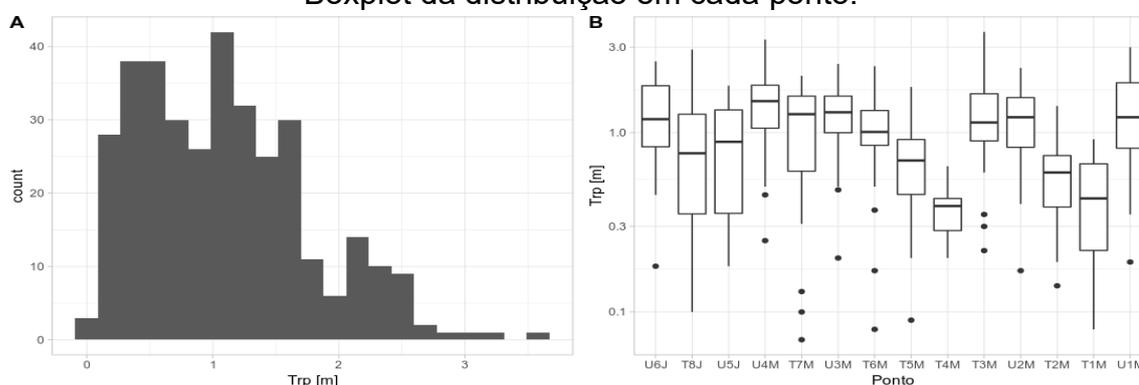
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura A 2 - Gráficos da Turbidez. (A) Histograma da Distribuição. (B) Boxplot da distribuição em cada ponto.



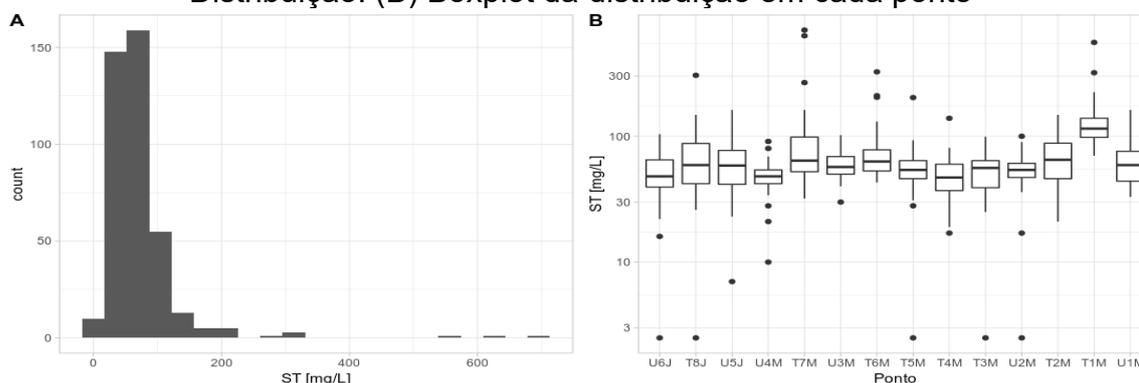
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura A 3 - Gráficos da Transparência da Água. (A) Histograma da Distribuição. (B) Boxplot da distribuição em cada ponto.



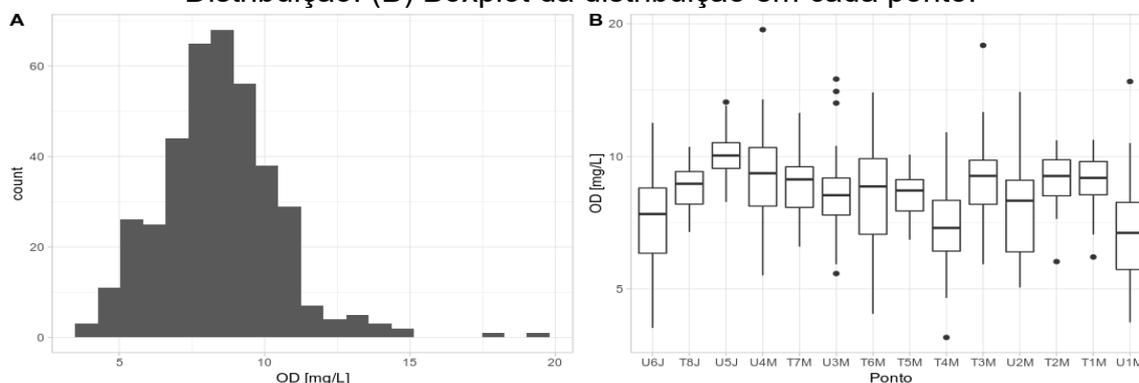
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura A 4 - Gráfico da concentração de Sólidos Totais. (A) Histograma da Distribuição. (B) Boxplot da distribuição em cada ponto



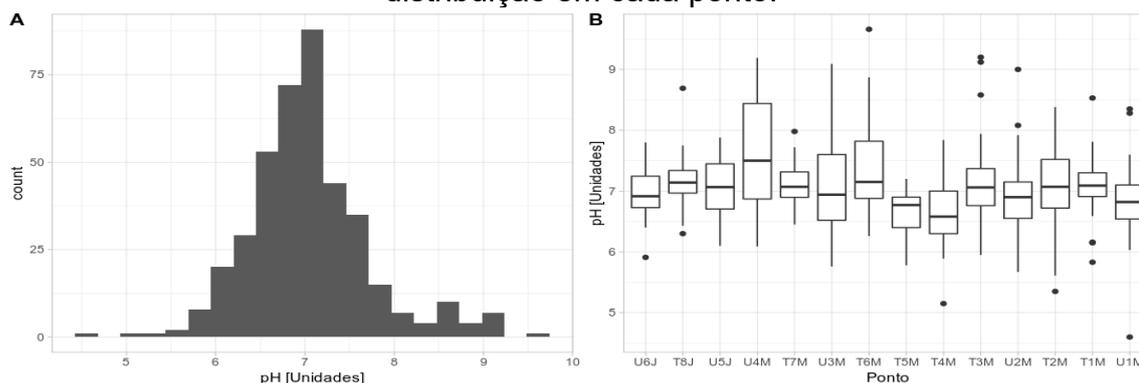
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura A 5 - Gráfico da concentração de Oxigênio Dissolvido. (A) Histograma da Distribuição. (B) Boxplot da distribuição em cada ponto.



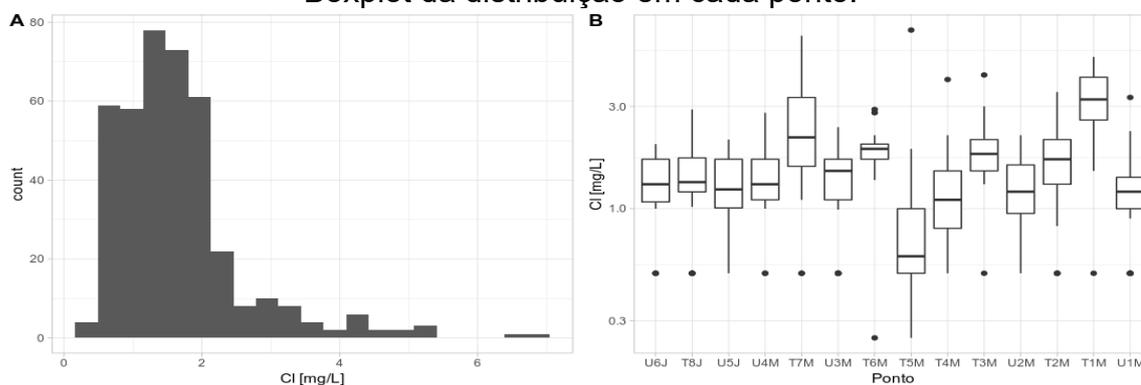
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura A 6 - Gráfico do pH. (A) Histograma da Distribuição. (B) Boxplot da distribuição em cada ponto.



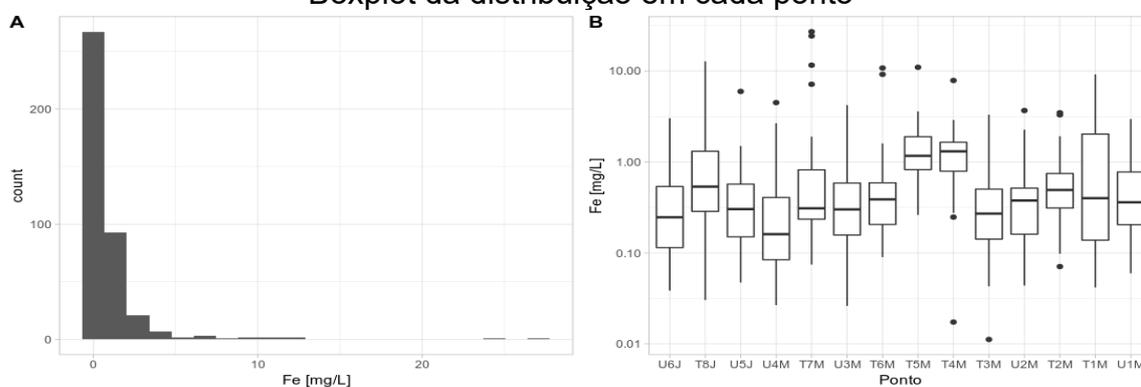
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura A 7 - Gráfico da concentração de Cloretos. (A) Histograma da Distribuição. (B) Boxplot da distribuição em cada ponto.



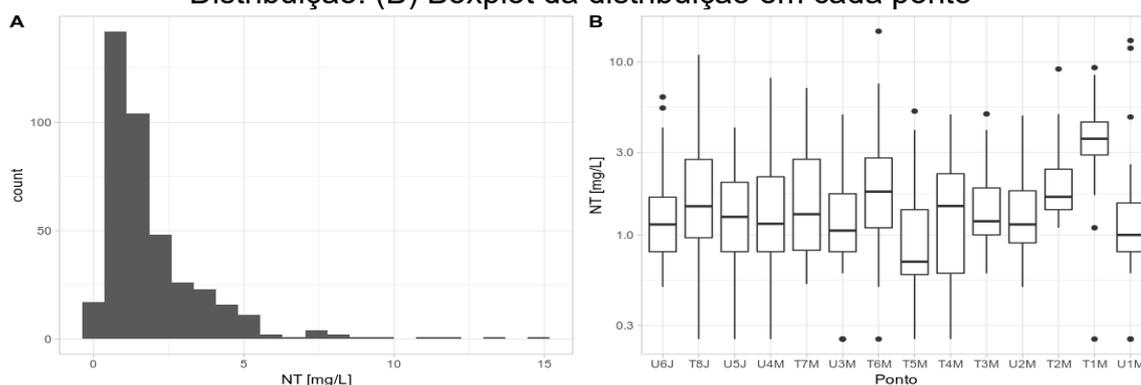
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura A 8 - Gráfico da concentração de Ferro. (A) Histograma da Distribuição. (B) Boxplot da distribuição em cada ponto



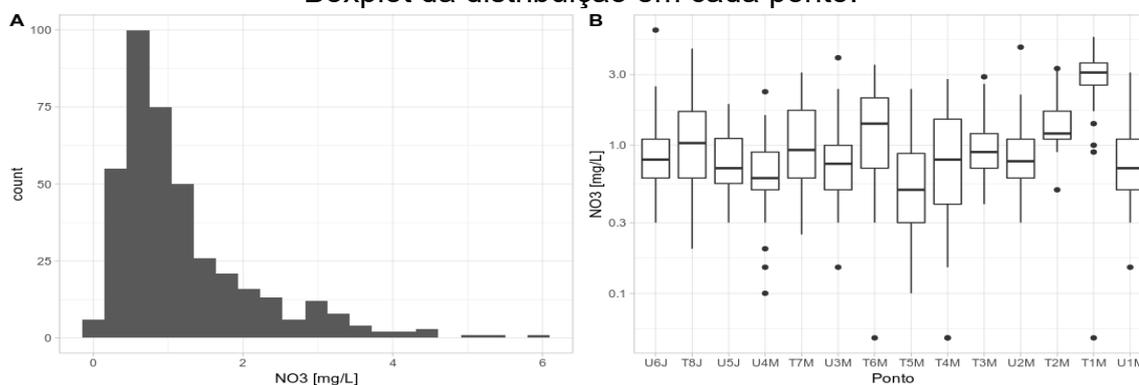
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura A 9 - Gráfico da concentração de Nitrogênio Total. (A) Histograma da Distribuição. (B) Boxplot da distribuição em cada ponto



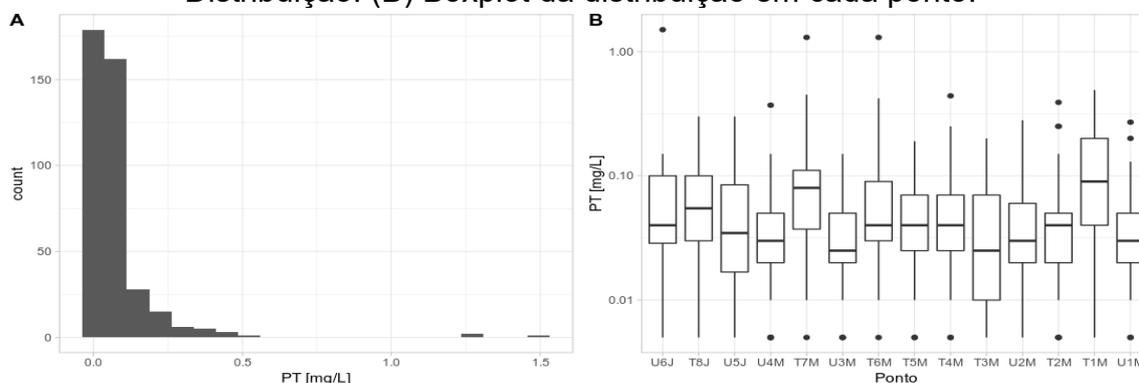
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura A 10 - Gráfico da concentração de Nitrato. (A) Histograma da Distribuição. (B) Boxplot da distribuição em cada ponto.



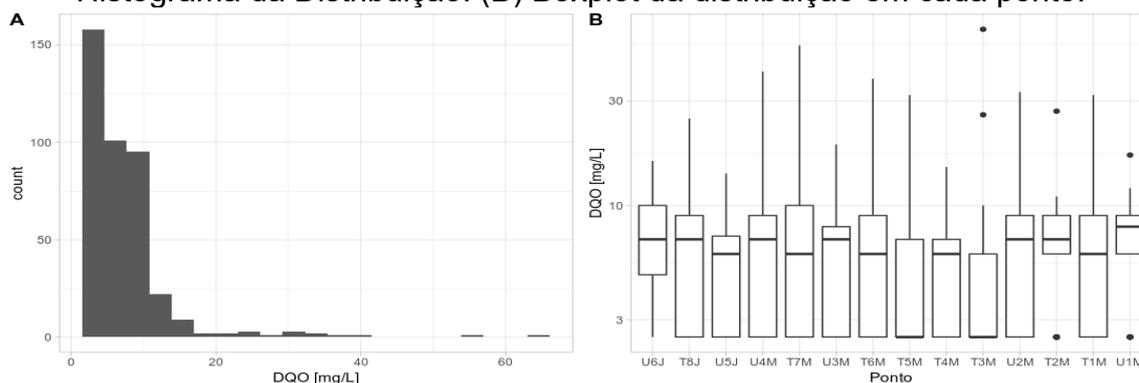
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura A 11 - Gráfico da concentração de Fósforo Total. (A) Histograma da Distribuição. (B) Boxplot da distribuição em cada ponto.



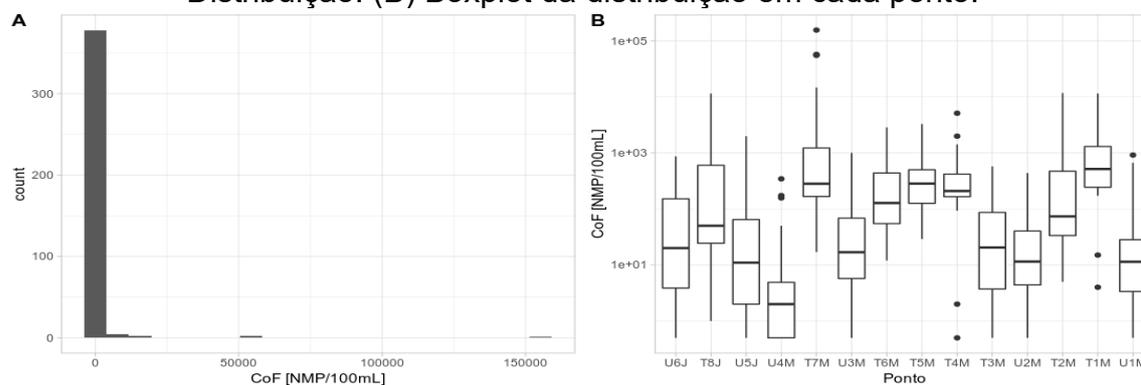
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura A 12 - Gráfico da concentração da Demanda Química de Oxigênio. (A) Histograma da Distribuição. (B) Boxplot da distribuição em cada ponto.



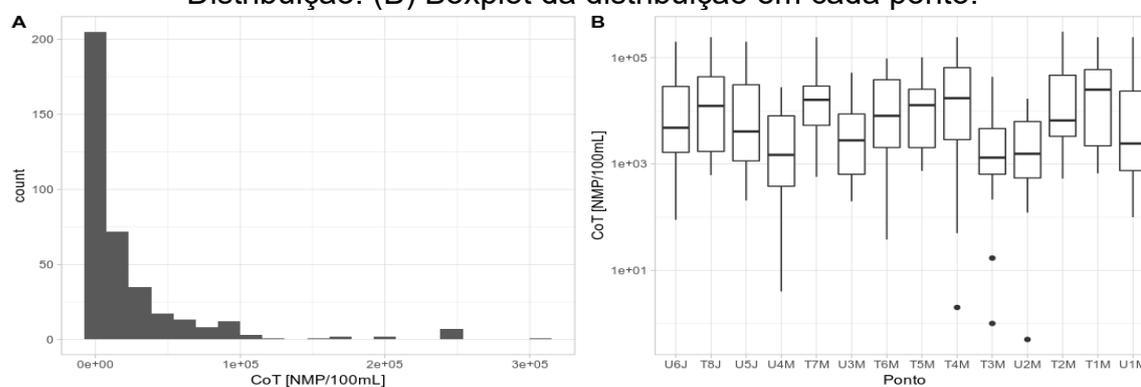
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura A 13 - Gráfico da concentração de Coliformes Fecais. (A) Histograma da Distribuição. (B) Boxplot da distribuição em cada ponto.



Fonte: Elaborada pelo autor.

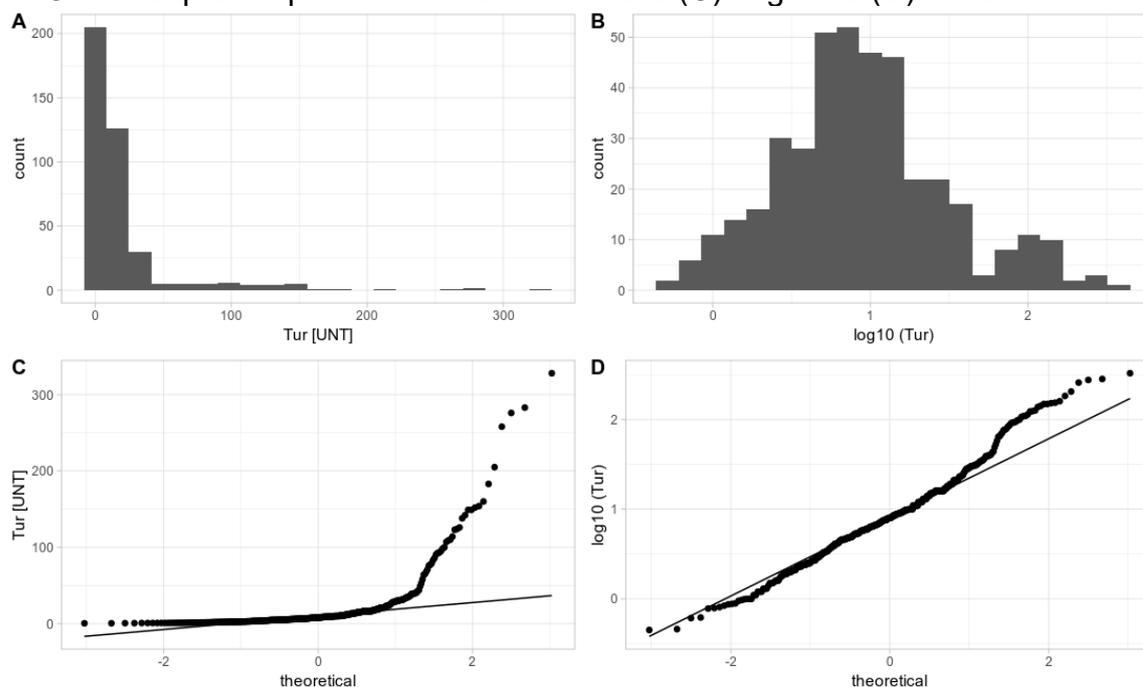
Figura A 14 - Gráfico da concentração de Coliformes Totais. (A) Histograma da Distribuição. (B) Boxplot da distribuição em cada ponto.



Fonte: Elaborada pelo autor.

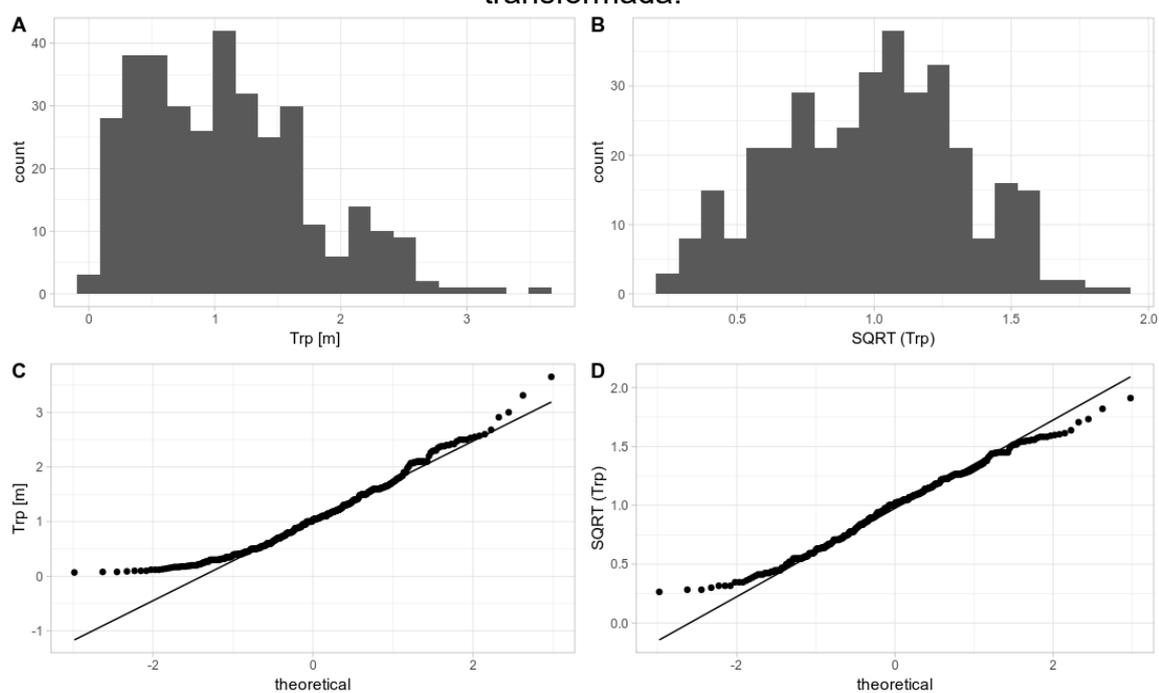
APÊNDICE B - Distribuição das variáveis após transformação segundo Box-Cox.

Figura B 1 - Histogramas da variável Turbidez (A) original e (B) transformada. Gráficos quantil-quantil da variável Turbidez (C) original e (D) transformada.



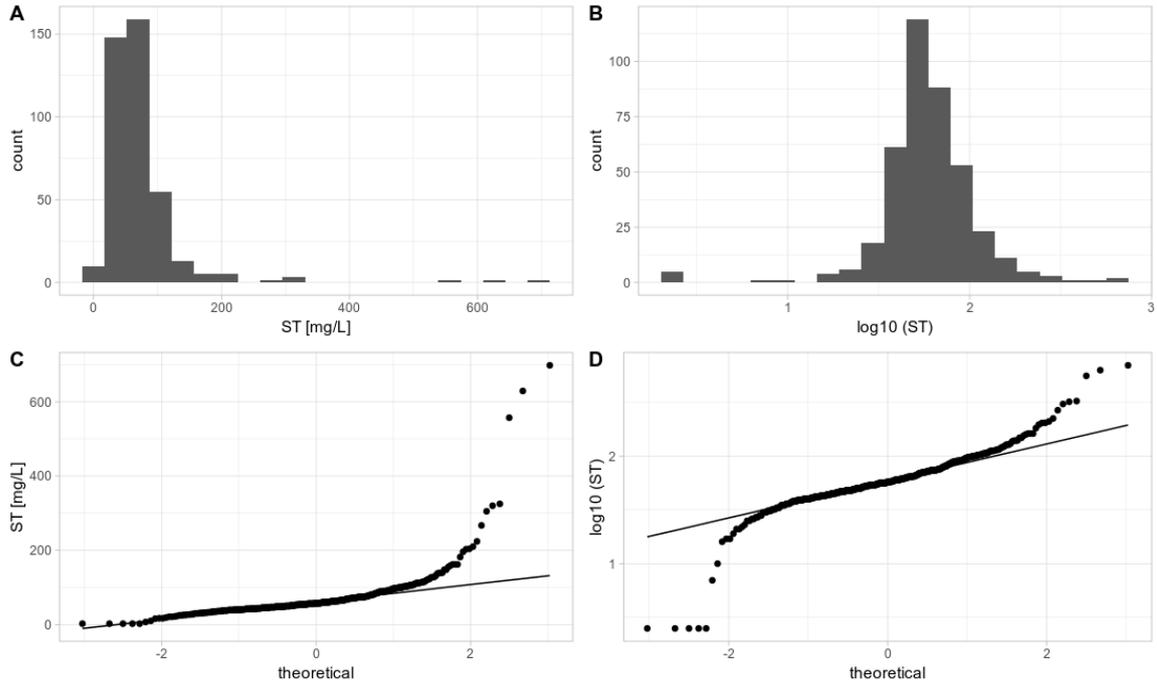
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura B 2 - Histogramas da variável Transparência (A) original e (B) transformada - raiz quadrada. Gráficos quantil-quantil da variável Transparência (C) original e (D) transformada.



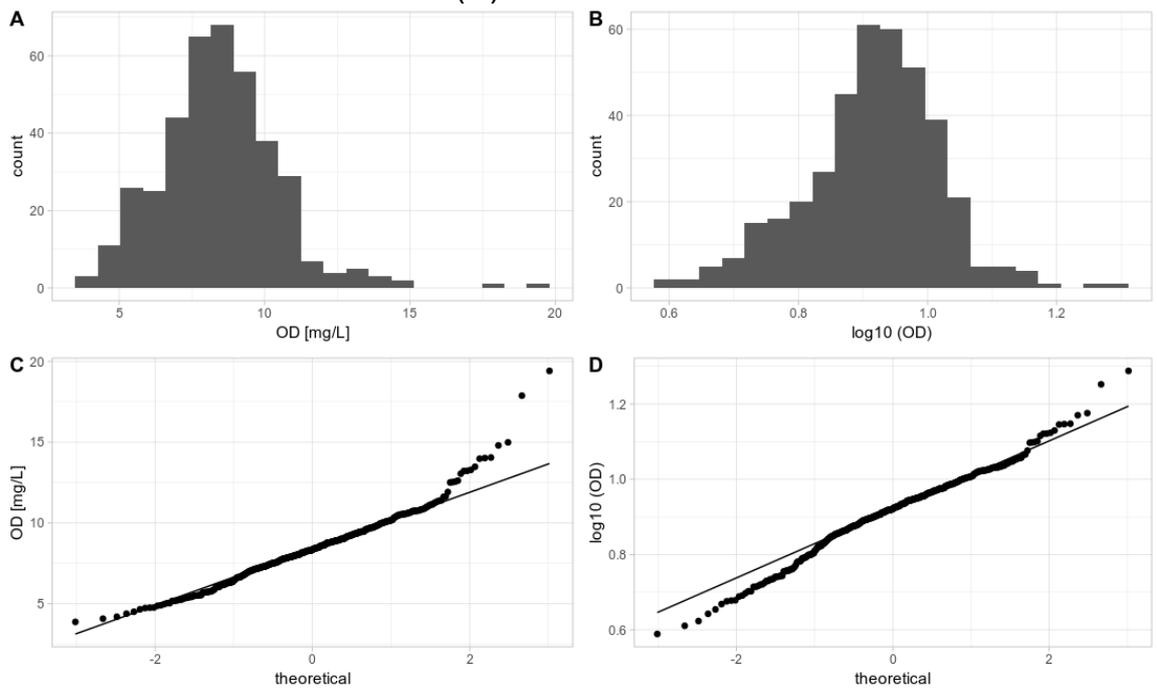
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura B 3 - Histogramas da variável Sólidos Totais (A) original e (B) transformada - \log_{10} . Gráficos quantil-quantil da variável Sólidos Totais (C) original e (D) transformada.



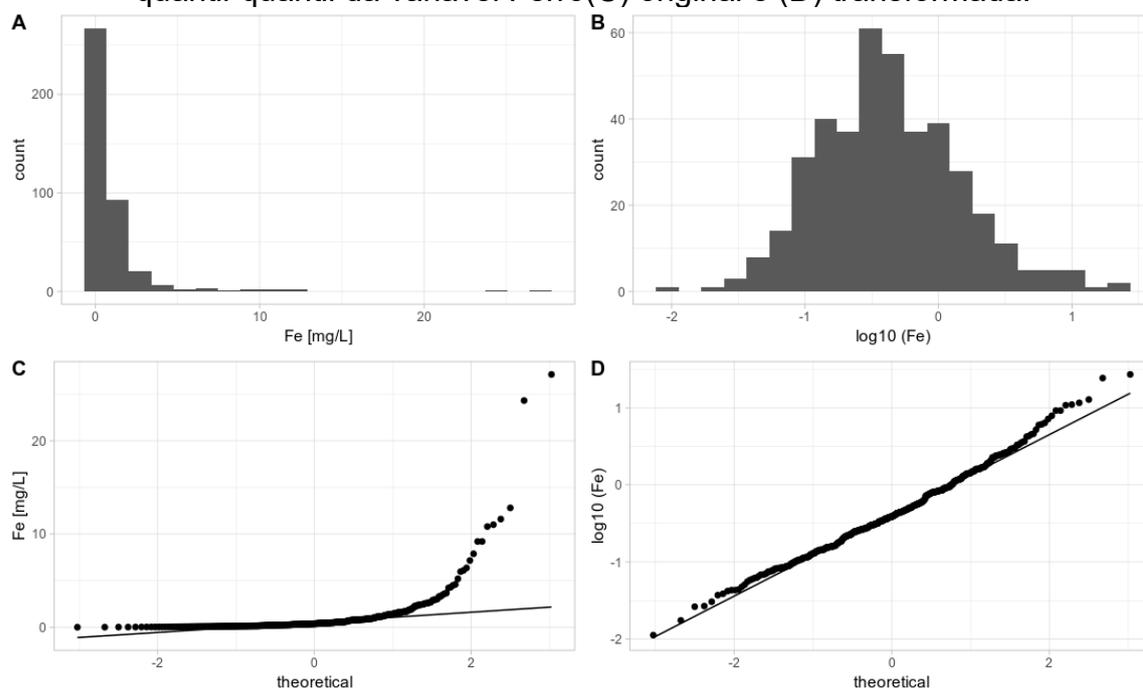
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura B 4 - Histogramas da variável Oxigênio Dissolvido (A) original e (B) transformada. Gráficos quantil-quantil da variável Oxigênio Dissolvido (C) original e (D) transformada.



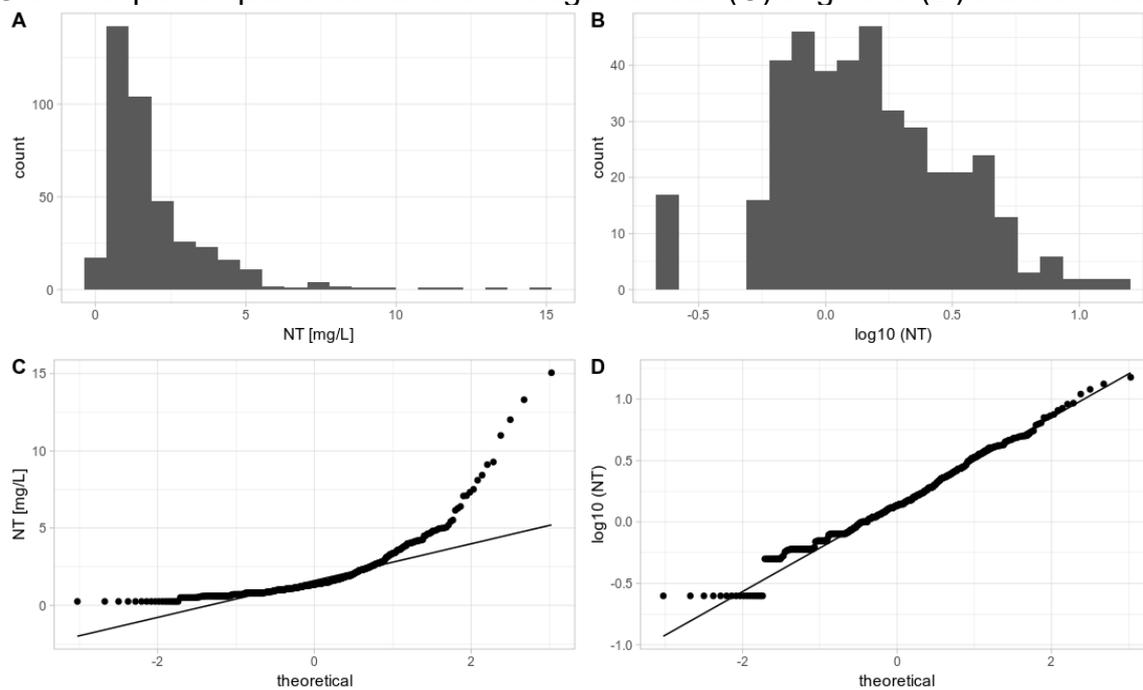
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura B 5 - Histogramas da variável Ferro (A) original e (B) transformada. Gráficos quantil-quantil da variável Ferro(C) original e (D) transformada.



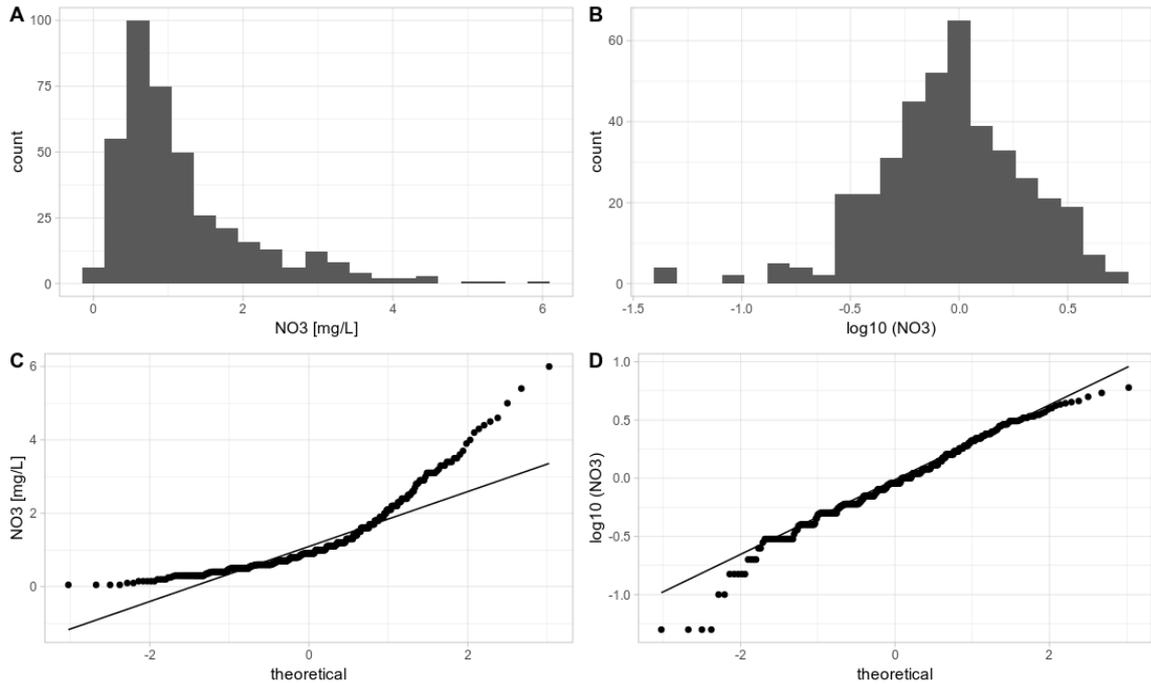
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura B 6 - Histogramas da variável Nitrogênio Total (A) original e (B) transformada. Gráficos quantil-quantil da variável Nitrogênio Total (C) original e (D) transformada.



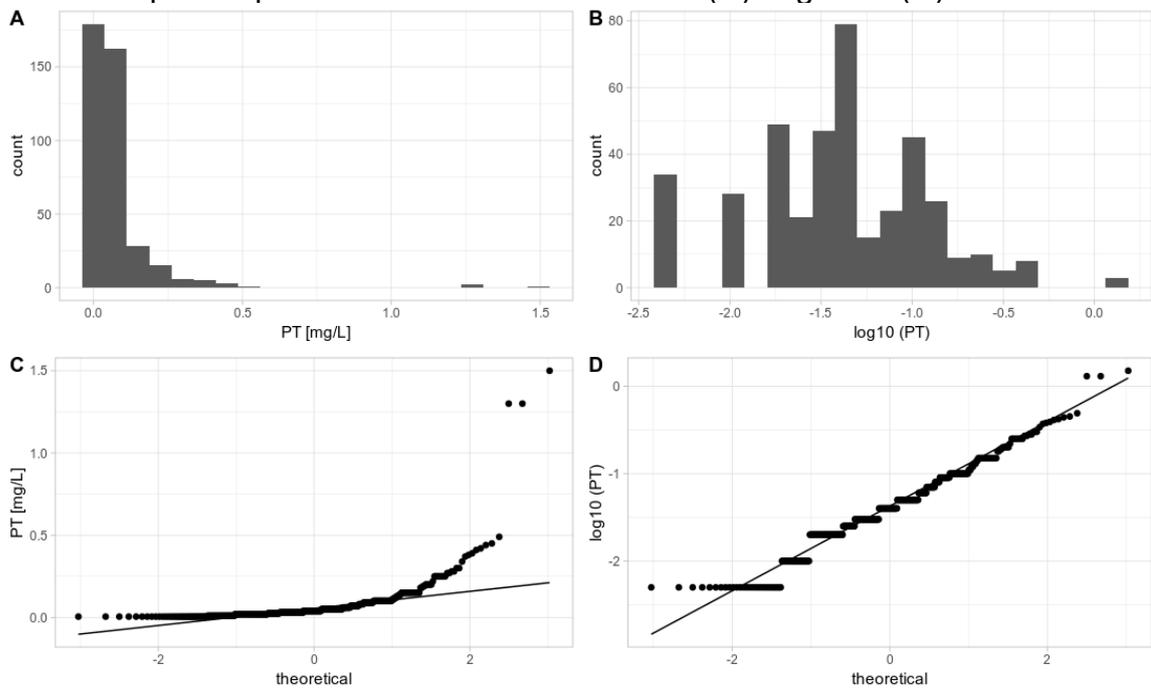
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura B 7 - Histogramas da variável Nitrato(A) original e (B) transformada. Gráficos quantil-quantil da variável Nitrato (C) original e (D) transformada.



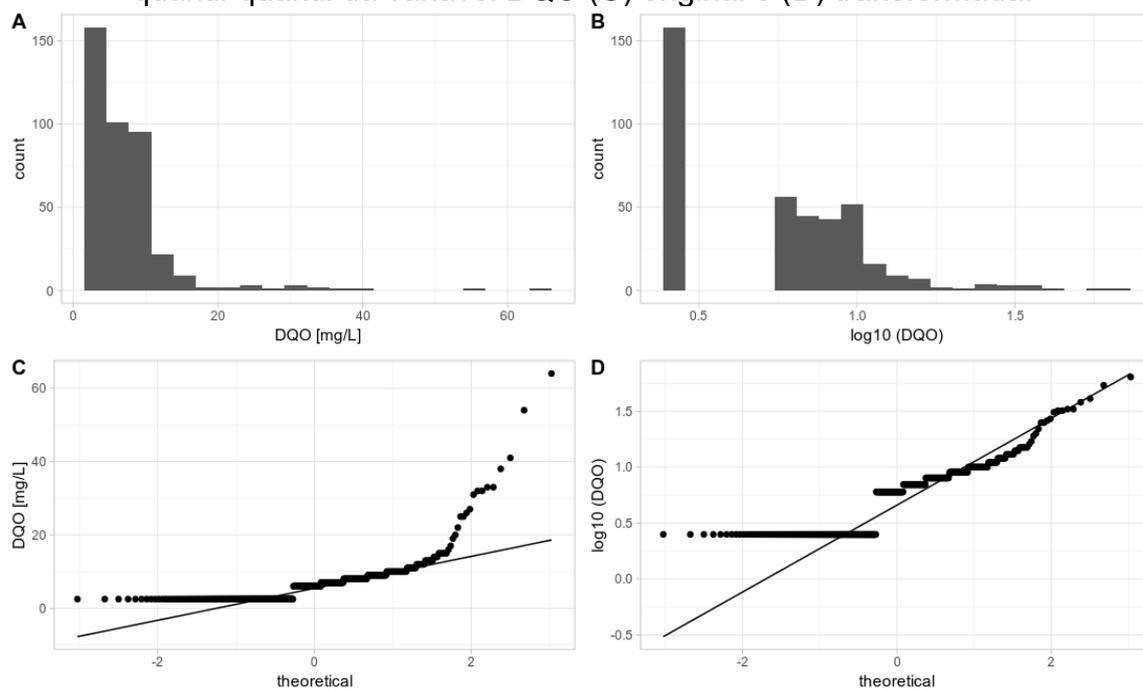
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura B 8 - Histogramas da variável Fósforo Total (A) original e (B) transformada. Gráficos quantil-quantil da variável Fósforo Total (C) original e (D) transformada.



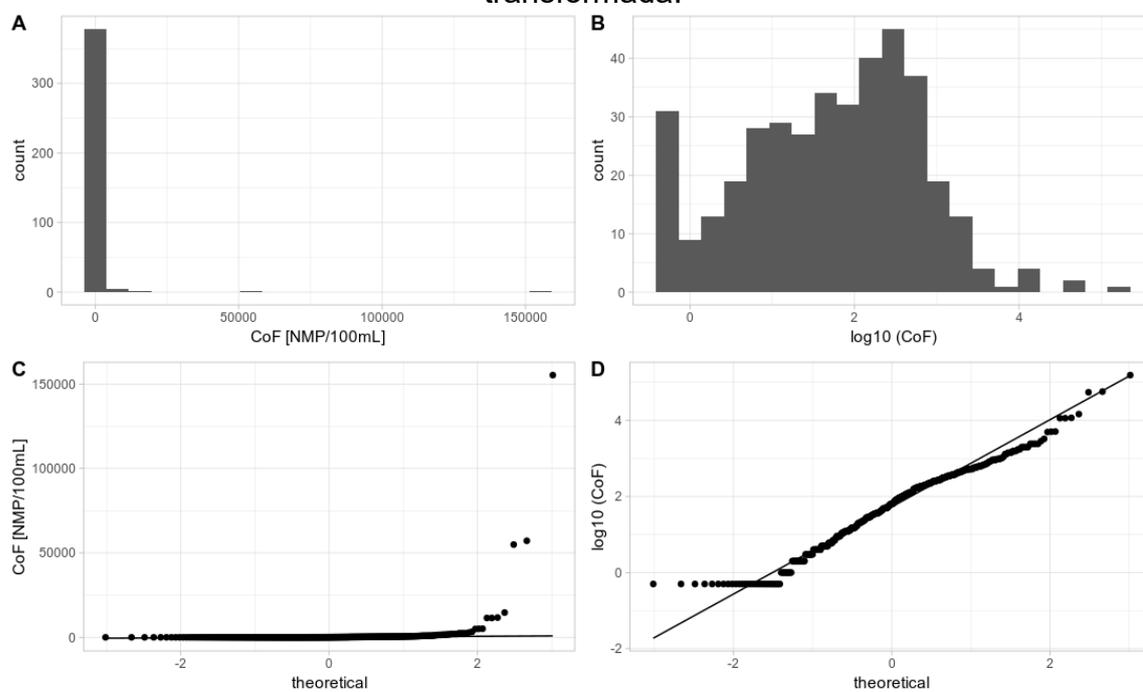
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura B 9 - Histogramas da variável DQO (A) original e (B) transformada. Gráficos quantil-quantil da variável DQO (C) original e (D) transformada.



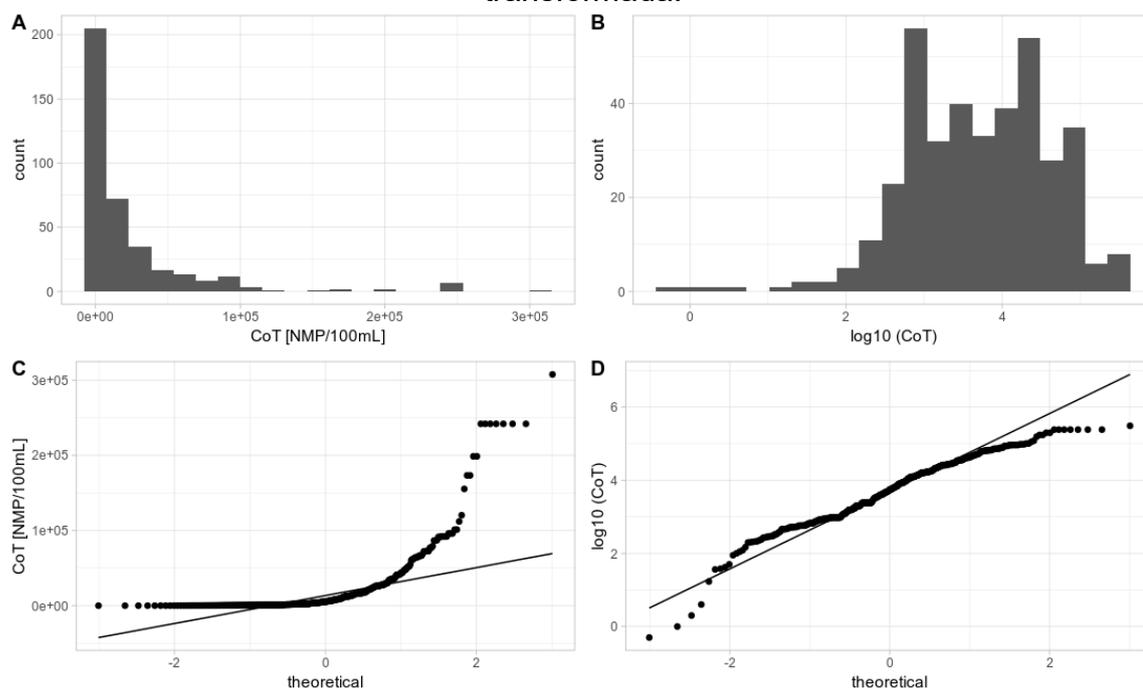
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura B 10 - Histogramas da variável Coliformes Fecais (A) original e (B) transformada. Gráficos quantil-quantil da variável Coliformes Fecais (C) original e (D) transformada.



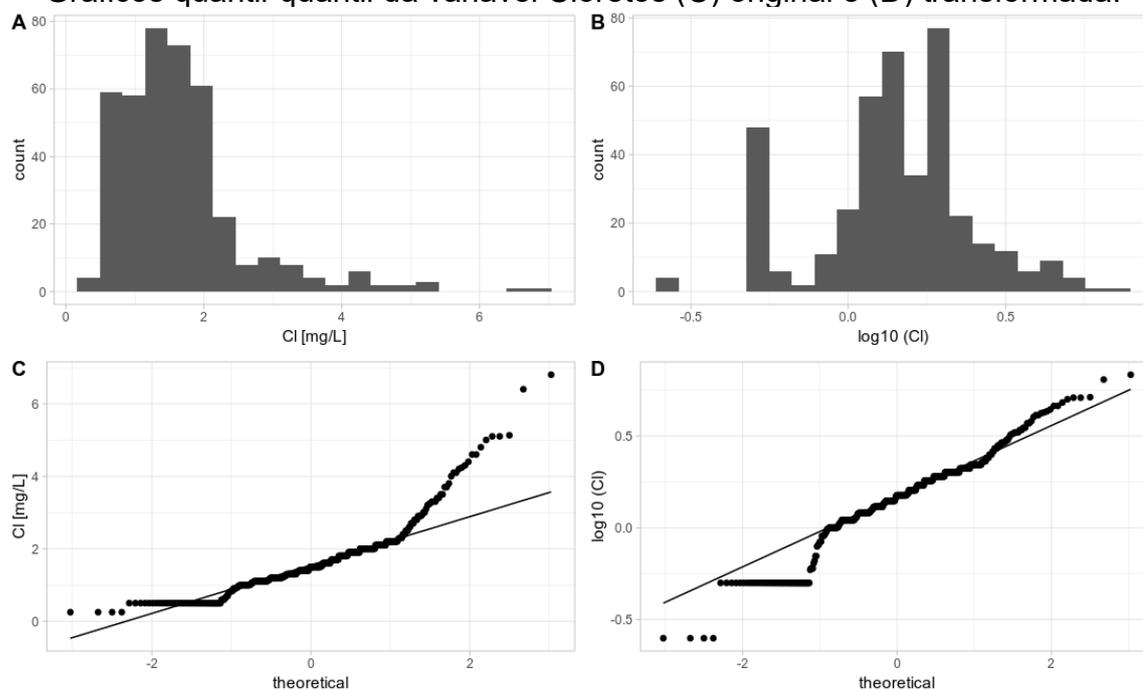
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura B 11 - Histogramas da variável Coliformes Totais (A) original e (B) transformada. Gráficos quantil-quantil da variável Coliformes Totais (C) original e (D) transformada.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura B 12 - Histogramas da variável Cloretos (A) original e (B) transformada. Gráficos quantil-quantil da variável Cloretos (C) original e (D) transformada.



Fonte: Elaborada pelo autor.