

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**VICTÓRIA XIMENES NASCIMENTO**

**MODELAGEM MATEMÁTICA DA AUTODEPURAÇÃO DE UM TRECHO DO RIO  
JACUÍ - RS**

**Caçapava do Sul  
2019**

**VICTÓRIA XIMENES NASCIMENTO**

**MODELAGEM MATEMÁTICA DA AUTODEPURAÇÃO DE UM TRECHO DO RIO  
JACUÍ - RS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária.

Orientador: Prof. Dr. Mateus Guimarães da Silva

**Caçapava do Sul  
2019**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos  
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do  
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

N244m Nascimento, Victoria Ximenes

Modelagem Matemática da Autodepuração de um trecho do Rio  
Jacuí - RS / Victoria Ximenes Nascimento.

62 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade  
Federal do Pampa, ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA, 2019.

"Orientação: Mateus Guimarães da Silva ".

1. modelo QUAL-UFMG. 2. Poluição Hídrica. 3. Qualidade da  
água. I. Título.

**VICTÓRIA XIMENES NASCIMENTO**

**CARACTERIZAÇÃO DA BACIA BAIXO JACUÍ E MODELAGEM MATEMÁTICA  
DA AUTODEPURAÇÃO DE UM TRECHO DO RIO JACUÍ - RS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 20 de Novembro de 2019

Banca examinadora:

---

Prof. Dr. Mateus Guimarães da Silva  
Orientador  
UNIPAMPA

---

Prof. Dra. Maria Amélia Zazycki  
UNIPAMPA

---

Prof. Dr. Pedro Kemerich  
UNIPAMPA

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus e a vida, agradeço a oportunidade.

Aos meus pais e a minha família agradeço todo o apoio, confiança, companheirismo e dedicação a mim, sem vocês nada disso seria possível.

Aos meus amigos em especial Ewerton, Davi, Jefferson e Leonardo agradeço por cada minuto ao lado de vocês, pelos momentos bons e ruins, os conselhos e as façanhas e todo companheirismo, obrigada por deixarem essa etapa mais leve e colorida.

Ao Leonardo e sua família a minha gratidão eterna por todo o amor, carinho e cuidado, vocês fazem parte dessa conquista.

A todos os professores envolvidos nessa jornada, principalmente aos que foram essenciais para na minha formação e orientação, obrigada pelo profissionalismo, dedicação e principalmente pela dádiva de compartilhar conhecimento.

Em especial agradeço também a FEPAM, o Laboratório de Hidrogeologia da Universidade Federal de Santa Maria e o Laboratório de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto da Universidade Federal de Santa Maria campus Frederico Westphalen ao apoio e a contribuição para a realização deste trabalho.

Enfim, a todos que me ajudaram e influenciaram direta ou indiretamente essa conquista.

Muito obrigada!

## RESUMO

A poluição das águas com despejos dos esgotos domésticos, efluentes industriais, agrotóxicos e dejetos de animais, devido ao crescimento populacional acelerado e concentrado, somado ao uso indiscriminado dos recursos naturais é uma preocupação mundial. A deterioração das águas tem consequências graves como quadros de escassez, problemas de saúde pública, modificações na fauna aquática, além de outros impactos ambientais. Dessa forma, a caracterização do uso e ocupação do solo e a modelagem matemática podem ser ferramentas fundamentais no auxílio da gestão dos recursos hídricos. Neste contexto, este estudo tem como objetivo estimar a quantidade de efluentes domésticos gerados na bacia Baixo Jacuí, classificar o uso e ocupação do solo da região e avaliar o processo de autodepuração de um trecho do rio Jacuí por meio do modelo matemático QUAL-UFMG. Na região da bacia do baixo Jacuí é gerado em torno de 53.535.560 L/dia de efluente doméstico, onde apenas 56,36 % dos municípios inseridos na bacia contam com esgotamento sanitário adequado (fossa séptica ou rede geral). Os outros 43,64 % são despejados inadequadamente e diretamente em um corpo receptor ou nas redes de drenagem pluvial. Além disso, o rio Jacuí é exposto a diversas ações antrópicas, onde a agricultura é dominante; 68,07% da bacia é destinada para fins agrícolas, juntamente com a presença de centros urbanos e industriais (0,62%), áreas de solo exposto (7,67%) e áreas de floresta e água 22,07% e 1,58%, respectivamente. E de acordo com a modelagem, de modo geral as variáveis da qualidade da água do trecho do rio Jacuí estiveram dentro do padrão estabelecido conforme a Resolução CONAMA 357/05. Contudo para preservação das águas do Rio Jacuí há claramente a necessidade de investimentos e incentivos nas ações de planejamento do saneamento básico, principalmente na implantação de Estações de Tratamento de Esgotos - ETE nos municípios da região. Ademais, a Bacia do Baixo Jacuí possui atividade agrícola intensiva, o qual necessita de grande atenção dos órgãos ambientais, como fiscalização e medidas protetivas para que os recursos naturais da região sejam preservados.

Palavras-Chave: Poluição hídrica; qualidade da água; modelo QUAL-UFMG.

## ABSTRACT

Water pollution from domestic sewage, industrial effluents, pesticides and animal waste due to accelerated and concentrated population growth plus the indiscriminate use of natural resources is a worldwide concern. Water deterioration has serious consequences such as scarcity, public health problems, changes in aquatic fauna, and other environmental impacts. Thus, the characterization of land use and occupation and mathematical modeling can be fundamental tools to aid water resources management. In this context, this study aims to estimate the amount of domestic effluents generated in the Baixo Jacuí basin, to classify the use and occupation of the region's soil and to evaluate the self-purification process of a Jacuí river section using the QUAL-UFMG mathematical model. In the region of the lower Jacuí basin around 53.535.560 L / day of domestic effluent is generated, where only 56.36% of the municipalities in the basin have adequate sanitary sewage (septic tank or general network). The other 43.64% is discharged improperly and directly into a receiving body or rainwater drainage networks. In addition, the Jacuí River is exposed to various anthropic actions, where agriculture is dominant; 68.07% of the basin is intended for agricultural purposes, together with the presence of urban and industrial centers (0.62%), exposed soil areas (7.67%) and forest and water areas 22.07% and 1 , 58%, respectively. And according to the modeling, in general the water quality variables of the Jacuí river stretch were within the standard established according to CONAMA Resolution 357/05. However, in order to preserve the Jacuí River waters, there is clearly a need for investments and incentives in basic sanitation planning actions, especially in the implementation of Sewage Treatment Stations - ETE in the municipalities of the region. In addition, the Baixo Jacuí Basin has intensive agricultural activity, which needs the great attention of environmental agencies, such as inspection and protective measures to preserve the region's natural resources.

Keywords: Water pollution; water quality; QUAL-UFMG model.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Processo de autodepuração em um corpo hídrico ao longo do tempo e distância .....	14
Figura 2. Mecanismos interagentes do balanço de oxigênio dissolvido.....	15
Figura 3 Localização Geográfica da Bacia Hidrográfica do Baixo Jacuí.....	21
Figura 4 Localização das bacias hidrográficas do Rio Grande do Sul.....	23
Figura 5. Mapa de uso e ocupação do solo da bacia Baixo Jacuí.....	24
Figura 6. Trecho do Rio Jacuí estudado e Estações de Monitoramento.....	44
Figura 7. Representação do Trecho do Rio Jacuí com as fontes pontuais e difusas.....	45
Figura 8. Valores incrementais da vazão ao longo do trecho estudado.....	46
Figura 9. Gráfico representativo da modelagem dos parâmetros de OD e DBO.....	47
Figura 10. Gráfico representativo da modelagem dos coliformes totais.....	48
Figura 11- Gráfico representativo da modelagem de Nitrogênio e Fosforo ao longo do trecho estudado.....	49

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Valores típicos dos coeficientes $K_1$ e $K_d$ .....	32
Tabela 2. Valores típicos do coeficiente $K_2$ .....	33
Tabela 3. Percentual e tipo de tratamento de esgoto presentes na Bacia do Baixo Jacuí.....	36
Tabela 4. Tabela 4 - Percentual da área de classificação do uso e ocupação do solo na bacia Baixo Jacuí.....	40

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>11</b>
1.1 Justificativa	12
1.2 Objetivo Geral	13
1.3 Objetivos específicos	13
<b>2. CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA</b>	<b>13</b>
2.1 Gestão de Recursos Hídricos	13
2.2 Saneamento Básico - Esgotamento Sanitário	14
2.3 Recursos Hídricos e Saneamento Básico	15
2.4 Uso e Ocupação dos Solos	17
2.5 Autodepuração de Corpos Hídricos	18
2.6 Modelagem Matemática	23
<b>3. METODOLOGIA</b>	<b>26</b>
3.2 Classificação do Uso e Ocupação do Solo da Bacia Baixo Jacuí	30
3.3 Modelagem Matemática	31
3.4 Calibração do Modelo	35
3.5 Simulação de Cenários	36
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>37</b>
4.1. Tratamento do Esgoto Sanitário dos Municípios Presentes na Bacia	37
4.2 Classificação do Uso e Ocupação do Solo	40
4.3 Modelagem matemática da Autodepuração do Trecho do Rio Jacuí	43
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>50</b>
<b>6. REFERÊNCIAS</b>	<b>52</b>
<b>7. ANEXOS</b>	<b>61</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A água é um dos recursos naturais mais essenciais para vida na Terra. Mesmo sabendo da imensurável importância para nossas vidas e do risco eminente da falta da mesma, a poluição dos rios e reservatórios com uma carga maior do que a sua capacidade de autodepuração é crescente (SILVEIRA, 1999).

A crise de água no mundo em virtude da sua poluição e escassez tem gerado grande preocupação mundial, devido à degradação que vem sofrendo e sua má utilização. Cada vez mais as águas superficiais vêm sendo utilizadas como fonte de descarga doméstica, industrial e agrícola sem o devido controle ou autorização em vários casos (ZIANI et al., 2017)

O Brasil é um país com grande abundância hídrica, mas a distribuição irregular ao longo do seu território aliada ao crescimento populacional concentrado em determinadas localidades tem como consequência a degradação da qualidade dos corpos d'água caracterizando quadros de escassez, que é agravado pela gestão dos recursos hídricos ineficiente (FONSECA, 2008).

O uso e ocupação do solo têm implicação direta na qualidade da água. Ações antrópicas são uma das maiores causas de alteração da qualidade da água, seja de forma pontual, com a descarga de efluentes domésticos ou industriais, seja de forma difusa, com aplicação de defensivos e insumos agrícolas. A introdução de efluentes orgânicos nos rios é uma das ações mais significativas quanto a poluição das águas, devido ao elevado consumo de oxigênio para a sua deterioração e, conseqüentemente, menor quantidade de oxigênio disponível para a vida aquática (NUNES, 2008).

O processo natural de restabelecimento das características naturais de um corpo d'água quando submetido a lançamentos de efluentes é chamado de autodepuração, neste processo há um balanço entre as fontes de consumo e de produção de oxigênio do meio aquático, visto que as frações orgânicas dos efluentes são decompostas naturalmente por micro-organismos. Tal processo pode ser avaliado por meio de estudos de autodepuração, com o emprego de modelos matemáticos adequados (VON SPERLING, 2014).

A utilização da modelagem da autodepuração e da qualidade de água pode ser considerada uma importante ferramenta a ser empregada em estudos de poluição de rios, principalmente no que diz respeito ao atendimento a legislação e minimização dos impactos gerados pelo lançamento de efluentes, trazendo benefícios para comunidade, reduzindo a grande ameaça que a poluição de corpos hídricos traz para saúde pública e meio ambiente como um todo.

O rio Jacuí é um dos principais e maiores rios do estado do Rio Grande do Sul, possuindo uma extensão total em torno de 710 km. Sua área de drenagem é caracterizada pelo uso intensivo do solo para agricultura e pecuária. A região da bacia do baixo Jacuí, possui uma área de 17.345,15 km<sup>2</sup> e uma população de cerca 385.496 pessoas, abrangendo total ou parcialmente 40 municípios do estado. A bacia é caracterizada pelo cultivo da soja, trigo e arroz, pela pecuária e as atividades de mineração, como a extração de areia e carvão (SEMA, 2019; FEPAM, 2019).

Neste contexto, este estudo realizou a caracterização da bacia Baixo Jacuí, a estimativa de efluente doméstico total lançado nela e também a caracterização do uso e ocupação do solo da bacia Baixo Jacuí. Além disso, foi feita a modelagem do processo de autodepuração de um trecho do Rio Jacuí, por meio do modelo matemático QUAL-UFMG. Ressalta-se que este estudo até o presente momento é ausente na bacia, o que torna imprescindível o seu desenvolvimento.

## **1.1 Justificativa**

Devido à grande problemática da poluição das águas, da lacuna existente do tratamento de efluentes e do uso indiscriminado do solo, o desenvolvimento deste trabalho pode ser essencial para bacia do Baixo Jacuí, uma vez que o estudo é ausente na literatura. A estimativa da quantidade de efluentes que o rio é capaz de receber sem que suas características naturais sejam prejudicadas, pode contribuir para preservação da qualidade da água do rio Jacuí, podendo evitar problemas de saúde pública, modificações na biota e microbiota aquática e diversos outros impactos ambientais, além de estimular o lançamento correto de efluentes e desenvolvimento de medidas protetivas para a bacia.

## **1.2 Objetivo Geral**

O objetivo geral deste trabalho foi analisar a capacidade de autodepuração e qualidade da água de um trecho do rio Jacuí por meio do modelo matemático QUAL-UFMG.

## **1.3 Objetivos específicos**

- Estimar a geração de efluente doméstico na bacia Baixo Jacuí;
- Caracterizar o uso e ocupação do solo da bacia Baixo Jacuí;
- Avaliar o potencial poluidor da região da bacia Baixo Jacuí;
- Modelar os parâmetros da qualidade da água do rio Jacuí;
- Avaliar a capacidade de autodepuração de um trecho do Rio Jacuí.

## **2. CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 Gestão de Recursos Hídricos**

Os recursos hídricos de acordo com a Consultoria Legislativa (2004), é a parcela de água doce acessível à humanidade, ou seja, são as águas superficiais e subterrâneas disponíveis para uso. Segundo a Agência Nacional das Águas – ANA (2018), estima-se que 97,5% da água existente no mundo é salgada e não é adequada ao consumo humano. Dos 2,5% de água doce, a maior parte (69%) é de difícil acesso, pois está concentrada nas geleiras, 30% são águas subterrâneas e 1% encontra-se nos rios.

O Brasil é um país privilegiado, por dispor de mais água doce do que qualquer outro país no mundo, no entanto, os brasileiros já sentiram o efeito da escassez. Cerca de 75% da água do Brasil está localizada nos rios da Bacia Amazônica, que é habitada por menos de 5% da população. A disponibilidade de água é menor onde a maior parte da população se encontra (ANA, 2017). Logo, notavelmente o uso das águas precisa ser gerenciado de forma correta e bem pensada para que não prejudique a qualidade de vida do ser humano, para que ela

esteja disponível de forma adequada para seus diversos usos, evitando assim conflitos entre regiões, e problemas de saúde pública.

O gerenciamento das águas de forma adequada é fundamental para que os recursos hídricos possam ser protegidos e utilizados pelos seres vivos, atendendo às suas necessidades. Para que o uso desse recurso seja bem administrado, dispõe-se a Gestão de Recursos Hídricos, que com um conjunto de ações regula, controla o uso e protege esse recurso essencial. Tal gerenciamento é feito conforme a legislação vigente e de forma a preservar em quantidade e qualidade as águas (BRASIL, 1997).

## **2.2 Saneamento Básico - Esgotamento Sanitário**

O Saneamento Básico de modo geral, é o conjunto de medidas que visa preservar ou modificar as condições do meio ambiente com a finalidade de prevenir doenças e promover a saúde com os serviços de infraestrutura e Instalações operacionais de abastecimento de água, esgotamento sanitário, limpeza urbana, drenagem urbana, manejos de resíduos sólidos e de águas pluviais. Tais serviços visam melhorar a qualidade de vida da população e a produtividade de cada indivíduo, além de facilitar a atividade econômica (BRASIL, 2019).

De acordo com Metcalf e Eddy (2014) o esgoto sanitário pode ser compreendido como uma mistura de resíduos líquidos ou carreados pela água após atividade antrópica, originárias de residências, instituições, estabelecimentos comerciais e industriais, o qual podem estar misturados com águas subterrâneas, superficiais e águas pluviais.

O esgotamento sanitário é um dos serviços de saneamento que mais necessita de investimento para o encaminhamento de soluções, principalmente quando voltado para a gestão hídrica. No País, de toda a carga orgânica gerada (9,1 mil toneladas de DBO/dia), apenas 39% é removida com a infraestrutura de tratamento de esgotos existente nas sedes dos municípios brasileiros. Como resultado, em termos de carga orgânica remanescente, cerca de 5,5 mil toneladas DBO/dia podem alcançar os corpos receptores. (ANA, 2017).

## 2.3 Recursos Hídricos e Saneamento Básico

Conforme dados divulgados pela Organização Mundial da Saúde - OMS (2017), cerca de 2,1 bilhões de pessoas não têm acesso a água potável e disponível em casa, e 4,4 bilhões de pessoas não têm acesso a saneamento básico gerido de forma segura. No Brasil, apesar da abundância dos recursos hídricos, o acesso não chega na mesma qualidade e quantidade para todos. Ainda segundo a OMS (2008), 28 mil pessoas morrem por ano no Brasil de doenças provocadas por água contaminada ou de doenças relacionadas com a falta de higiene.

De acordo com alguns especialistas a crise da água no século XXI, é muito mais de gerenciamento do que uma crise real de escassez e estresse (ROGERS et al., 2005). O saneamento básico, tratamento de esgotos, recuperação de mananciais, drenagem e tratamento correto de resíduos sólidos, juntamente com a gestão dos recursos hídricos são prioridades fundamentais no Brasil, que com uma base de dados consolidada e transformada em instrumento de gestão pode ser uma das formas mais eficazes para enfrentar o problema de escassez, estresse e deterioração da qualidade da água (TUNDISI, 2008).

Conforme Leoneti et al. (2011), os investimentos em saneamento básico devem trabalhar o conceito de desenvolvimento sustentável, de preservação e conservação do meio ambiente e principalmente dos recursos hídricos para atender a requisitos técnicos, ambientais, sociais e econômicos, que refletem no planejamento do desempenho do saneamento básico.

A carência de coleta e tratamento de esgotos nas cidades brasileiras têm como resultado uma parcela expressiva de carga poluidora chegando aos corpos hídricos, gerando consequências negativas aos usos múltiplos dos recursos hídricos. Portanto, a integração entre as políticas de saneamento básico e recursos hídricos, é essencial para que os objetivos de ambas sejam alcançados (ANA, 2017). Os serviços de água tratada, coleta e tratamento dos esgotos levam à melhoria da qualidade de vidas das pessoas, na despoluição dos rios e preservação dos recursos hídricos, etc (BRASIL 2019).

## 2.2 Legislação Ambiental

A legislação referente às questões ambientais (legislação ambiental) foi criada com o objetivo de disciplinar o uso dos recursos naturais, a água, o solo, as florestas, o ar e os animais, por surgir a consciência da problemática do uso desenfreado e ameaça de escassez dos nossos recursos naturais, tanto pela redução de sua quantidade, quanto pela deterioração da sua qualidade. De modo geral, as normas visam disciplinar a conduta humana para a proteção ambiental e o consumo racional dos recursos naturais, normas estas que influenciaram o surgimento de um novo ramo jurídico, que é o Direito Ambiental. (BORGES et.al., 2009).

A Lei de 8 de janeiro 1997, é responsável por orientar a Gestão de Recursos Hídricos em nosso país, disciplinando o planejamento e a gestão dos recursos hídricos no território nacional, introduzindo vários instrumentos de política para o setor, entre os quais o Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), e a criação da Agência Nacional de Águas (ANA), responsável pela implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e pela de implementação da Lei 9433 a nível federal (BRANCO, 2006). Desse modo, a lei nº 9433/1997 instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), que cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, com o objetivos de:

- Assegurar à atual e às futuras gerações a necessária disponibilidade de água, em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos;
- A utilização racional e integrada dos recursos hídricos, incluindo o transporte aquaviário, com vistas ao desenvolvimento sustentável;
- A prevenção e a defesa contra eventos hidrológicos críticos de origem natural ou decorrentes do uso inadequado dos recursos naturais.

Em julho de 2000 foi estabelecido a Lei nº 9.984, esta lei cria a Agência Nacional de Águas- ANA, entidade federal de implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos, integrante do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, estabelecendo regras para a sua atuação, sua estrutura administrativa e suas fontes de recursos. Em 2003 determinou-se o Decreto nº

4.613, de 11 de março de 2003 que e regulamenta o Conselho Nacional de Recursos Hídricos, e dá outras providências.

Em 2005, foi estabelecido a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA nº 357, que dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências.

A lei federal nº 11.445 de 5 de janeiro de 2007 estabeleceu as diretrizes nacionais para o saneamento básico e definiu uma Política Federal de Saneamento Básico (BRASIL, 2007). A lei estabelece uma série de diretrizes essenciais para essa integração, como a adoção da bacia hidrográfica como unidade de referência para o planejamento das ações e a necessidade de compatibilização dos planos de saneamento com os planos de bacia (BRASIL, 2017)

No dia 13 de Maio de 2011, foi instituída a Resolução do CONAMA nº430, que dispõe as condições e padrões de lançamento de efluentes, assim, complementando e alterando a Resolução do CONAMA nº 357/2005.

## **2.4 Uso e Ocupação dos Solos**

O uso do solo é uma combinação de um tipo de uso (atividade) e de um tipo de assentamento (edificação), ou seja, é o conjunto das atividades processos individuais de produção e reprodução de uma sociedade sobre uma aglomeração urbana estabelecidos sobre localizações individualizadas, combinadas com seus padrões ou tipos atividades do ponto de vista da regulação espacial (DEÁK, 2001).

A Lei de Uso e Ocupação do Solo estabelece critérios e parâmetros de uso e ocupação do solo, com o objetivo de orientar e ordenar a utilização e ocupação do espaço urbano, com o objetivo maior de garantir o desenvolvimento da cidade de forma equilibrada e sustentável (GIL, 2015).

O uso e a ocupação do solo alteram sensivelmente os processos físico-químicos e biológicos dos sistemas naturais (MENEZES, 2016). Os diversos usos do solo possuem grande influência sobre a qualidade da água e sobre os ecossistemas aquáticos dentro de uma bacia hidrográfica, e inúmeros problemas relacionados com a qualidade da água são causados pelo mau uso do solo, como

urbanização, atividades industriais e agrícolas. (MENEZES et al., 2014; FIA et al., 2015).

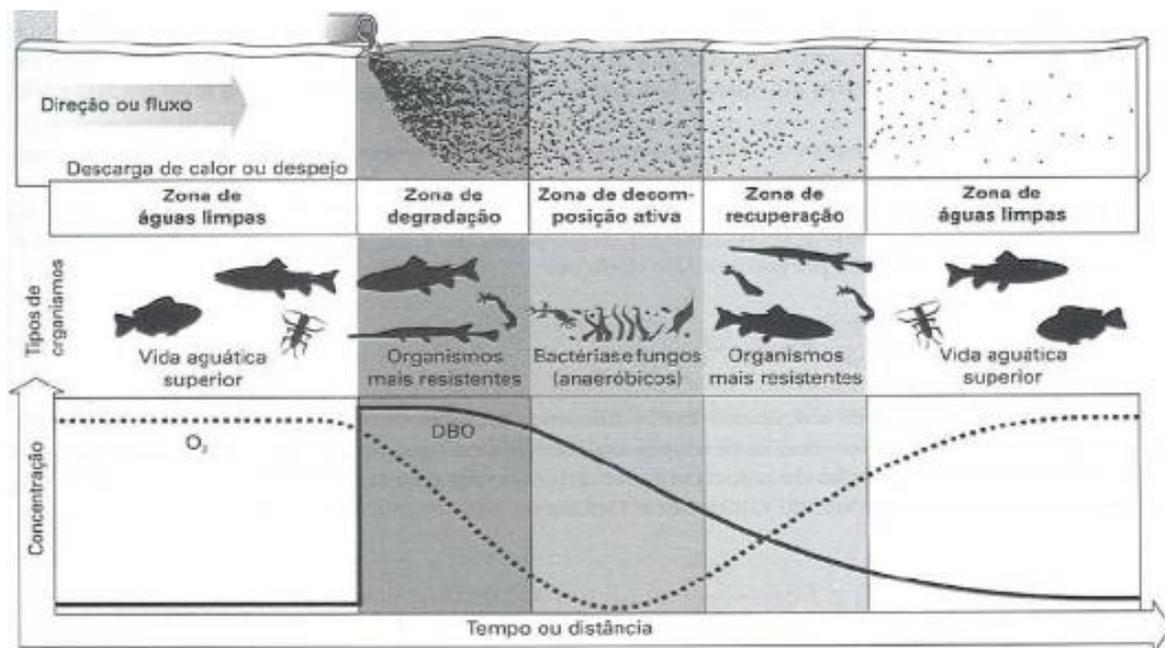
## **2.5 Autodepuração de Corpos Hídricos**

O processo de autodepuração é um processo natural onde um rio pode recuperar suas características naturais quando submetido a lançamentos de um poluente, dentro de certos limites. No entanto, várias inibições podem perturbar esse processo. Se a carga de poluentes for maior que a capacidade de assimilação de água, indicada pela alta concentração de poluentes em relação ao padrão limiar de qualidade, então terá um impacto na qualidade da água do rio. As capacidades de autorecuperação de cada fluxo não são as mesmas e dependem das características de cada rio, incluindo a velocidade do fluxo, o volume do efluente e o conteúdo inicial de resíduos presentes na água do rio. (ZUBAIDAH. et.al., 2019; YUSTIANI, 2017).

No processo de autodepuração há um balanço entre as fontes de consumo e produção de oxigênio. O oxigênio consumido para decomposição da matéria orgânica por microrganismos, é quantificado em função da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e a produção oxigênio em função do oxigênio dissolvido (OD). Ressalta-se que o oxigênio dissolvido tem sido utilizado para a determinação do grau de poluição e de autodepuração de corpos d'água (VON SPERLING, 2014).

O processo de autodepuração se desenvolve ao longo da direção longitudinal e do tempo do curso d'água, além disso, os estágios de sucessão ecológica presentes nesse processo são identificados por trechos conforme apresentado na Figura 1. Esses trechos são chamados de zonas de autodepuração que são divididas em zona de águas limpas, de degradação, de decomposição ativa e zona de recuperação (BRAGA et.al, 2005).

Figura 1 – Processo de autodepuração em um corpo hídrico ao longo do tempo e distância.



Fonte: Braga et al, 2005.

Ainda segundo Braga (2005), a zona de águas limpas está localizada na região à montante do lançamento do efluente e também após a zona de recuperação, é caracterizada pela elevada concentração de oxigênio dissolvido e vida aquática superior; A zona de degradação é caracterizada pela diminuição inicial na concentração de oxigênio dissolvido, presença de organismos mais resistentes e aumento da concentração de DBO; A zona de decomposição ativa o ecossistema começa a se organizar, a concentração de oxigênio dissolvido atinge o valor mínimo e a vida aquática é predominada por bactérias e fungos (anaeróbicos); A zona de recuperação é onde se inicia a etapa de restabelecimento do equilíbrio do corpo hídrico à suas condições naturais, a concentração de oxigênio dissolvido na água começa a se recuperar pela reaeração, conseqüentemente, há uma diminuição significativa na concentração de DBO na água.

O processo natural de autodepuração consiste, portanto, em vários fenômenos complexos que envolvem inúmeros fatores físicos (diluição, sedimentação e reaeração atmosférica), químicos (oxidação) e biológicos (decomposição) que atuam e interagem de forma eficaz (VAGNETTI, 2003; VON SPERLING, 2018).

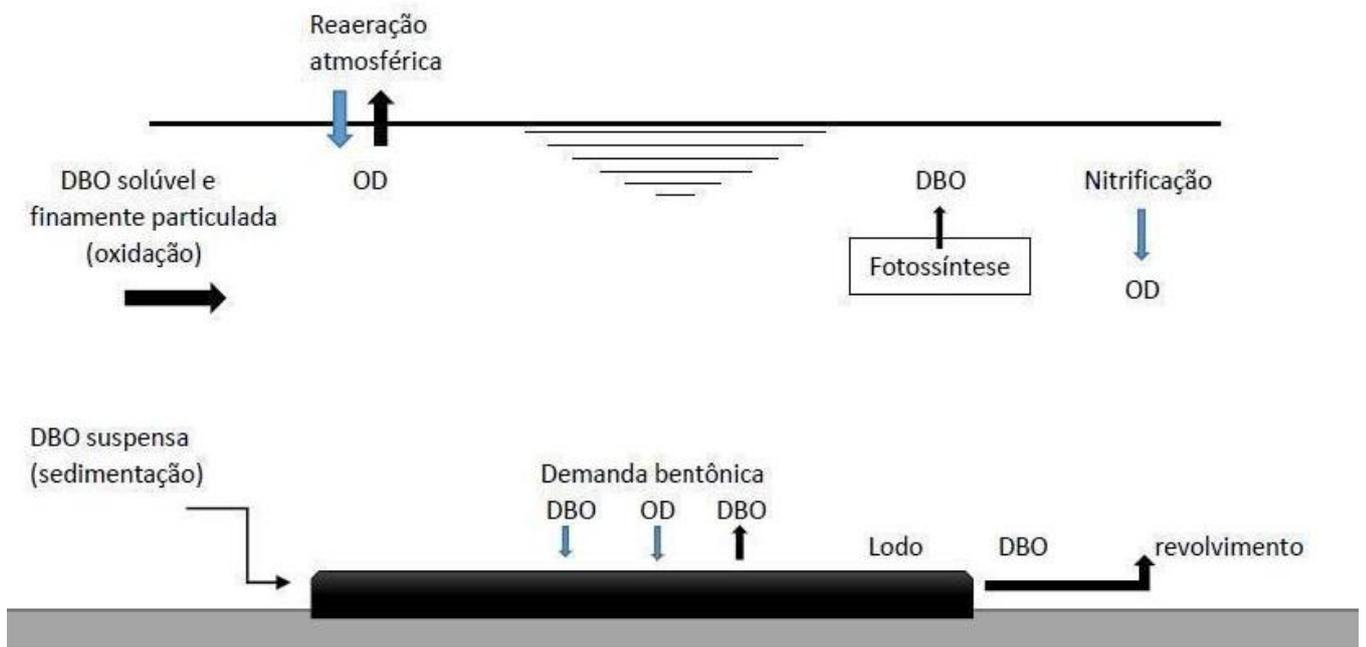
## 2.5.1 Parâmetros importantes da autodepuração

Segundo Von Sperling (2014), no processo de autodepuração há mecanismos importantes no consumo e produção de oxigênio, como:

- No consumo de oxigênio: a demanda bentônica, a nitrificação e a oxidação da matéria orgânica.
- Na produção de oxigênio: fotossíntese e a reaeração atmosférica.

Tais mecanismos e seu respectivo consumo e produção de oxigênio em um corpo d'água podem ser observados na Figura 2.

Figura 2 - Mecanismos interagentes do balanço de oxigênio dissolvido



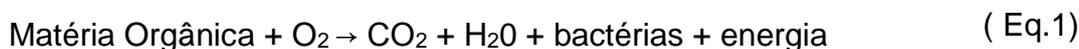
Fonte: Von Sperling, 2014 (Adaptado)

### 2.5.1.1 Consumo de Oxigênio

- **Oxidação da Matéria Orgânica**

De acordo com Von Sperling (2014) o processo de oxidação da matéria orgânica ocorre quando bactérias reagem com OD (oxigênio dissolvido) na água, esse processo corresponde ao principal fator de consumo de oxigênio. O consumo

de O<sub>2</sub> é realizado pela respiração de microrganismos decompositores. Essa reação tem como produto moléculas mais simples como água e gás carbônico, conforme ilustrado na Equação 1.

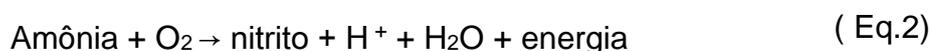


Ainda segundo Von Sperling, a matéria orgânica nos esgotos se apresenta de duas formas: em suspensão e dissolvida. A matéria em suspensão (ou particulada), tende a sedimentar no corpo d'água, formando o lodo de fundo. A matéria dissolvida (solúvel), e a matéria suspensa de pequenas dimensões (de difícil sedimentação), permanece na massa líquida.

- **Nitrificação**

O processo de nitrificação é realizado por bactérias autotróficas que utilizam o oxigênio dissolvido para transformar formas nitrogenadas de matéria orgânica em nitritos (NO<sup>2-</sup>) e nitratos (NO<sup>3-</sup>). As bactérias Nitrosomonas e Nitrobacter, que são responsáveis por esse processo, realizam a oxidação da amônia a nitrito e a oxidação do nitrito a nitrato, respectivamente, ilustradas nas Equações 2 e 3 (CAMPOS, 1999; VON SPERLING, 2018).

A reação simplificada abaixo caracteriza a transformação da amônia em nitrito:



Em seguida, a reação simplificada da transformação do nitrito em nitrato:



De acordo com Von Sperling (2014), o consumo de oxigênio por estas reações é denominado demanda nitrogenada ou demanda de segundo estágio, por ocorrer numa fase posterior a das reações de oxidação da matéria orgânica carbonácea. Isso ocorre porque as bactérias nitrificantes possuem uma taxa de crescimento mais lenta que as bactérias heterotróficas.

- **Demanda bentônica**

A matéria orgânica decantada (lodo) também pode consumir oxigênio dissolvido, e nesse caso, essa demanda é denominada demanda bentônica ou demanda de oxigênio pelo sedimento. A camada superficial do lodo em contato direto com a água geralmente sofre decomposição aeróbia, resultando no consumo de oxigênio. Além disso, o consumo de oxigênio neste caso também pode ser realizado pelo revolvimento do lodo sedimentado, que pode ocorrer devido ao aumento da vazão e velocidade da água de um corpo hídrico (BOWIE et al., 1985; VON SPERLING, 2014).

Por outro lado, a maior parte da conversão dessa matéria orgânica se dá em condições anaeróbias, em virtude da dificuldade de penetração do oxigênio na camada de lodo, essa forma de conversão, por ser anaeróbia, não implica, portanto, em consumo de oxigênio (VON SPERLING, 2014).

### **2.5.1.2 Produção de Oxigênio**

- **Reaeração atmosférica**

A reaeração atmosférica é, frequentemente, um dos principais fatores responsáveis pela introdução de oxigênio no meio líquido (COX, 2003). Esse processo se dá por meio da transferência do oxigênio atmosférico, que é um fenômeno físico em que moléculas de gases são trocadas entre o meio líquido e gasoso pela sua interface. Esse intercâmbio resulta num aumento da concentração do oxigênio na fase líquida, caso esta não esteja saturada com o gás. Esta transferência do meio gasoso para o meio líquido se dá basicamente por meio de dois mecanismos: a difusão molecular e a difusão turbulenta (VON SPERLING, 2014).

- **Fotossíntese**

A fotossíntese é o principal processo utilizado pelos seres autotróficos, o qual ocorre nos organismos procariontes e eucariontes, isto é, em bactérias, algas e plantas. Os fatores essenciais para a fotossíntese são a retirada do dióxido de carbono do meio para a formação de compostos orgânicos e a conversão de energia luminosa em energia química. Os seres autótrofos realizam muito mais síntese do que oxidação, gerando sempre excesso de oxigênio, ou seja, o processo de fotossíntese pode representar a maior fonte de OD em lagos e rios de movimento lento. Esse processo ocorre na presença de energia luminosa, conforme pode-se observar na Equação 4 (MARGULIS, 2001; KRAUS 2003; VON SPERLING, 2014).



## **2.6 Modelagem Matemática**

Um modelo matemático é formado por equações matemáticas que estabelecem a relação entre as variáveis externas ou entradas e as variáveis de interesse ou saídas de um determinado modelo físico. De modo geral é uma representação de um sistema em uma linguagem de fácil acesso e uso, com o objetivo de entendê-lo e buscar respostas perante diferentes variáveis. É uma ferramenta para atingir um determinado objetivo, que pode ser utilizada para entender melhor o comportamento de um sistema e antecipar os eventos, quantificando os impactos de um determinado distúrbio no sistema antes mesmo que ele ocorra para que todas as medidas preventivas possam ser tomadas (FRAGOSO et al., 2009).

O primeiro modelo de qualidade da água criado foi o modelo de Streeter-Phelps. O modelo estima a qualidade da água através do perfil de oxigênio dissolvido. De acordo com o modelo, a simulação de oxigênio dissolvido (OD) é feita por meio do princípio da cinética baseada em dois fenômenos, a desoxigenação e a reaeração (STREETER e PHELPS, 1925). Segundo Von Sperling (2014), a estrutura desse modelo serviu de base para a maioria dos modelos mais avançados e disponíveis na atualidade.

Nas últimas 3 décadas, a tecnologia ganhou muitos avanços e, com isso, aumentou o uso de computadores na área de recursos hídricos, que promoveu uma série de desenvolvimentos significativos no campo da modelagem da qualidade da água e estes resultaram em uma variedade de modelos, como o SIMCAT, QUAL-2K, QUAL2E, QUASAR, MIKE-11 e ISIS, OutorgaLS, AcquaNet, QUAL-UFMG, entre outros (TERCINI, 2014). Para mais informações sobre os respectivos modelos, consulte Fleck et. al (2013) que desenvolveram um resumo dos principais modelos matemáticos de qualidade da água e suas aplicações.

### **2.6.1 Modelo QUAL-UFMG**

O modelo matemático QUAL-UFMG foi desenvolvido e baseado no modelo QUAL2-E, criado pela US Environmental Protection Agency (USEPA), que é utilizado para a simulação de rios, a nível mundial (VON SPERLING, 2014). O QUAL-UFMG foi criado por Marcos Von Sperling em 2007, e é desenvolvido através de planilhas no Excel. A plataforma em Excel do modelo é versátil, de fácil utilização e de modelagem unidimensional. O modelo possibilita a modelagem de constituintes ao longo do rio como, a demanda bioquímica de oxigênio (DBO), oxigênio dissolvido (OD), nitrogênio total e suas frações (orgânico, amoniacal, nitrito e nitrato), fósforo total e suas frações (orgânico e inorgânico) e coliformes termotolerantes (fecais) ou *E.coli* (VON SPERLING, 2014).

As simplificações na implementação do QUAL-UFMG em relação ao QUAL2-E de acordo com Von Sperling (2014), envolvem a não inclusão da modelagem de algas e todas suas inter-relações com os demais constituintes, visto que esse parâmetro contém alta complexidade e uma difícil tarefa de determinar os valores dos coeficientes para modelá-las. Além disso, envolvem a integração numérica pelo método de Euler por ser mais simples, e a desconsideração da dispersão longitudinal.

Segundo Von Sperling (2014), acredita-se que a principal vantagem do modelo QUAL-UFMG é a facilidade de uso, por sua simples interface, pelos gráficos gerados e por estar no idioma português. E sua principal desvantagem é a necessidade de curtos passos de integração, porém pelo fato do modelo não

apresentar grandes requisitos computacionais, podem ser adotadas curtas distâncias de integração, sem que isso gere tempos de cálculos excessivos.

Na literatura foram encontrados diversos trabalhos sobre modelagem de autodepuração de rios utilizando o modelo QUAL-UFMG. Salla et al. (2013) realizaram a capacidade de autodepuração do Rio Jordão localizado na bacia hidrográfica do Rio Dourados - MG considerando as contribuições reais do córrego Brejo Alegre em período de estiagem, e simulando cenários de lançamentos de cargas poluidoras e efluentes de estação de tratamento de esgoto (ETE), lançadas diretamente na confluência do córrego com o Rio Jordão para período crítico.

Tonon (2014) realizou um estudo de modelagem da qualidade da água utilizando os modelos STREETER-PHELPS e QUAL-UFMG na bacia do rio Lambari, avaliando o processo de autodepuração do rio no trecho que compreende o lançamento pontual do esgoto doméstico proveniente da área urbana de Poços de Caldas (MG). Além disso, o estudo também analisou alternativas de tratamento do efluente doméstico lançado no trecho impactado, onde há a construção de uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE).

Gomes (2016) realizou a modelagem da qualidade da água do Rio dos Sinos/RS utilizando o modelo QUAL-UFMG verificando o comportamento do oxigênio dissolvido em cenários hipotéticos, comparando a calibração do modelo QUAL-UFMG em diferentes períodos sazonais e averiguando a capacidade de aplicação deste modelo ao corpo hídrico estudado.

Recentemente, Oliveira Filho e Lima Neto (2018) realizaram um estudo com o objetivo de testar a plataforma QUAL-UFMG para modelagem da qualidade da água no rio Poti, na cidade de Teresina. Foram simulados diferentes cenários de vazão (máximas e mínimas) inerentes ao semiárido. Segundo os autores, o trabalho foi o primeiro estudo de modelagem da qualidade da água no referido rio e, também, de rios localizados em regiões semiáridas.

### **3. METODOLOGIA**

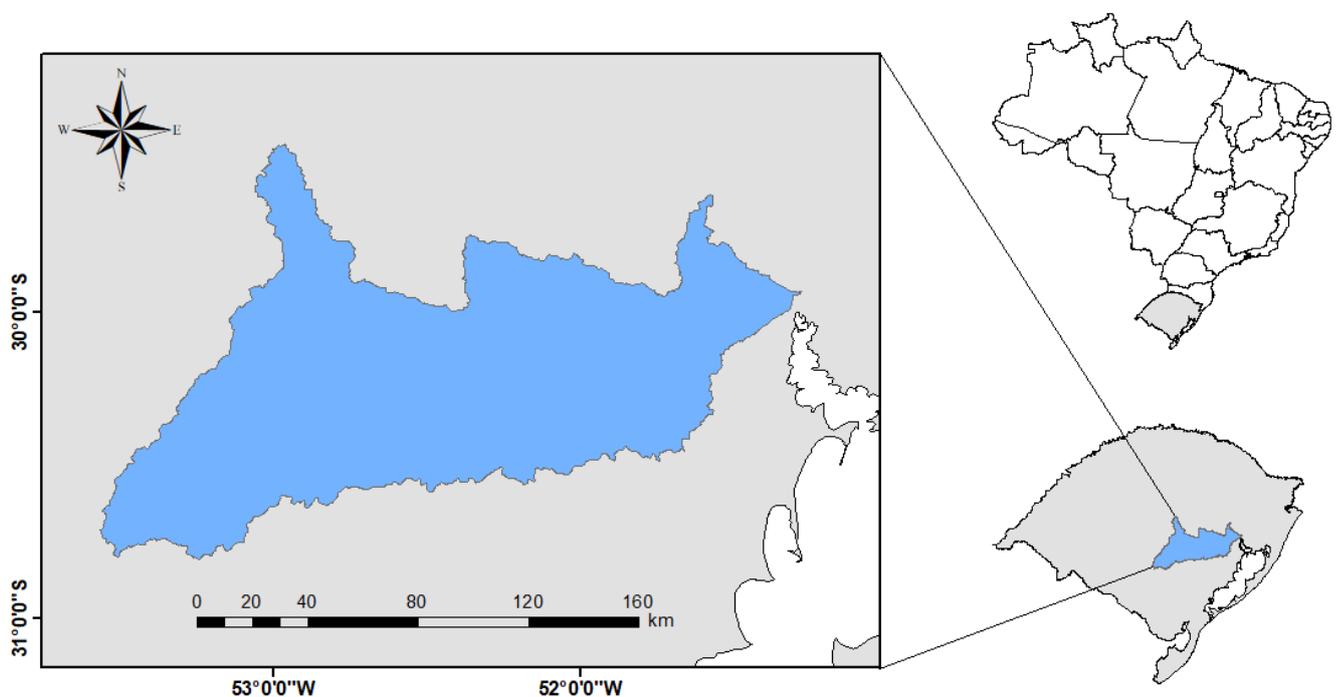
#### **3.1 Caracterização da Área de Estudo**

##### **3.1.2 Caracterização da Bacia Hidrográfica do Baixo Jacuí**

A Bacia Hidrográfica do Baixo Jacuí (Figura 3) está localizada entre as coordenadas geográficas 53°41'48" W a 51°18'27" W e 29°13'51" S a 30°48'03" S, na porção centro-leste do Estado do Rio Grande do Sul. A área da bacia corresponde um total de 17.345,15 km<sup>2</sup>, os principais cursos d'água da bacia são os arroios Irapuã, Capané, Botucacaí, Capivari, do Conde, dos Ratos, dos Cachorros, Ibacurú e o Rio Jacuí que abrange municípios do estado como Cachoeira do Sul, Charqueadas, Eldorado do Sul, Minas do Leão, Rio Pardo, São Jerônimo e Triunfo, com população estimada em 385.496 habitantes (SEMA, 2019; FEPAM, 2019).

Segundo a classificação climática de Koeppen, o clima no Rio Grande do Sul é do tipo subtropical úmido, sendo que a maior parte do seu território pertence ao grupo climático Cfa (sempre úmido com verões quentes) como é o caso da área estudada (bacia Baixo Jacuí). De modo Geral, a temperatura média anual varia entre 14°C e 22°C, porém o estado apresenta grande variação ao longo do ano, podendo apresentar mínimas negativas em algumas regiões no inverno e máximas próximas dos 40°C no verão. Além disso, a precipitação pluviométrica é bem distribuída ao longo do ano, com acumulados anuais que variam de 1000mm a mais de 2000mm (PESSOA, 2017).

Figura 3 - Localização Geográfica da Bacia Hidrográfica do Baixo Jacuí.



### Legenda

- Bacia Baixo Jacuí
- Rio Grande do Sul

Sistema de Coordenadas Geográficas  
Datum: SIRGAS 2000

Fonte: IBGE (adaptado).

De modo geral, a bacia é caracterizada principalmente pelo uso intensivo do solo para as atividades agrícolas e pecuária. A bacia se divide principalmente em áreas agrícolas (28%), campos/pastagens (28%) e vegetação nativa (29%). Na bacia destaca-se o cultivo de arroz irrigado (8% da área total da bacia) e a silvicultura (5%) (SEMA, 2015).

Segundo a FEPAM (2019), a extração do carvão na Bacia é intensa, causando significativo impacto ambiental, principalmente em Charqueadas e São Jerônimo. Além do mais, o rio Jacuí passa pelo Polo Petroquímico de Triunfo, onde o uso industrial tem destaque na região pelos ramos de química, plástico, metalurgia, siderurgia, borracha e produtos alimentares.

### 3.1.3 Rio Jacuí

Segundo a FEPAM (2019) o rio Jacuí é um dos principais e maiores rios do estado do Rio Grande do Sul, possui extensão total em torno de 710 km, com aproximadamente 370 km de trecho navegável. O rio está localizado na região hidrográfica do Guaíba, onde possui uma área total de 71.600 km<sup>2</sup>, que corresponde a 83,5 % da região. O rio é dividido em duas sub-bacias, Alto Jacuí e Baixo Jacuí, localizado ao norte e ao sul da região hidrográfica do Guaíba, respectivamente, como pode ser observado na Figura 4. Os principais afluentes do rio são, os Jacuí-mirim, Ivaí, Vacacaí-mirim, Vacacaí, Jacuizinho, Pardo e Taquari. Salienta-se que o Rio Jacuí contribui com 86,3% da vazão do Lago Guaíba.

Figura 4 - Localização das bacias hidrográficas do Rio Grande do Sul.



Fonte: SEMA (2002)

As principais nascentes do rio estão localizadas no Planalto, a cerca de 10 quilômetros a leste da cidade de Passo Fundo (RS). Toda sua área de drenagem é caracterizada pelo uso intensivo do solo para agricultura e pecuária. A área norte

do rio Jacuí (alto Jacuí) predominam as culturas intensivas de soja e trigo através do sistema de cultura rotativa, e o aproveitamento energético, onde estão instaladas as Usinas Hidrelétricas Ernestina, Passo Real, Salto do Jacuí, Itaúba e Dona Francisca. Na área sul (baixo Jacuí) além das culturas de soja e trigo há o cultivo do arroz, a pecuária e as atividades de mineração como, extração de areia e carvão. Além disso, a área de drenagem da bacia do Jacuí encontram-se aglomerações urbanas de porte significativo, destacando-se as cidades de Bento Gonçalves, Cachoeira do Sul, Caxias do Sul, Estrela, Lajeado, Rio Pardo, São Jerônimo, Taquari e Triunfo (SEMA, 2015; FEPAM, 2019).

### **3.1.4 Estimativa Populacional na Bacia Baixo Jacuí**

Conforme dados da SEMA (2008), 40 municípios do estado do Rio Grande do Sul estão inseridos parcialmente ou totalmente na Bacia do Baixo Jacuí. Destes 40 municípios que fazem parte da Bacia Hidrográfica do Baixo Jacuí, 12 municípios estão inseridos totalmente na bacia e 28 municípios estão inseridos parcialmente na bacia.

A literatura disponível que detalha os dados populacionais de cada município presente na bacia, é de 2008 (SEMA, 2008), dessa forma, para que a estimativa populacional fosse mais próxima da realidade, foi necessário a atualização dos dados populacionais. A atualização dos dados populacionais foi realizada segundo os dados publicados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2019), conforme a equação 5.

$$PABH = (PPIBH \times PA) / 100 \qquad \text{Eq. 5}$$

PABH = População atual inserida na Bacia Hidrográfica

PPIBH= Porcentagem do nº da população inserida na bacia conforme dados da SEMA (2008)

PA= População atual conforme dados IBGE (2019).

### 3.1.5 Estimativa do Tratamento do Esgoto Sanitário dos Municípios Presentes na Bacia

O levantamento de dados de esgotamento sanitário dos 40 municípios presentes na bacia foi realizado por meio de dados disponíveis pelo IBGE (2019). Segundo o IBGE (2019), o esgotamento sanitário adequado consiste em rede geral ou fossa séptica e o seu percentual foi realizado segundo a Equação 6.

$$ESA = [PTES / PT] \times 100 \quad \text{Eq.6}$$

ESA = Percentual de esgotamento sanitário adequado.

PTES= População total residente nos domicílios particulares permanentes com esgotamento sanitário do tipo rede geral e fossa séptica.

PT= População total residente nos domicílios particulares permanentes.

### 3.2 Classificação do Uso e Ocupação do Solo da Bacia Baixo Jacuí

O estudo da classificação do uso e ocupação do solo foi realizado em parceria com o Laboratório de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto e Laboratório de Hidrogeologia da UFSM. Inicialmente foram adquiridas duas cenas do Landsat 8 - LC82210812019227LGN00 e LC82220812019282LGN00 - datadas em 15 de agosto de 2019 e 09 de outubro de 2019, respectivamente, por meio do Serviço Geológico dos EUA (USGS, 2019). Para a classificação foi empregado o algoritmo *Support Vector Machine* do software *Envi 4.7*, licenciado pela UFSM, esse método foi utilizado pois apresenta pouco erro, em que, a acurácia encontrada foi de 0,87. As classes determinadas foram agricultura, água, área urbana, solo exposto e vegetação.

A avaliação da classificação foi conduzida com a inspeção ponto a ponto de amostras sorteadas aleatoriamente, sorteando 30 pixels e, posteriormente, foi gerada a matriz de confusão. Salienta-se que a zona urbana (mancha urbana) foi recortada antes de iniciar o processo de classificação e inserida posteriormente.

### 3.3 Modelagem Matemática

#### 3.3.1 Modelo QUAL-MG

Neste estudo o modelo matemático escolhido foi o QUAL-UFMG desenvolvido por Von Sperling (2014), justamente por ser um modelo gratuito, disponível no idioma português do Brasil e de fácil acesso. Segundo o Von Sperling (2014), o QUAL-UFMG é uma ferramenta que permite a modelagem matemática da autodepuração de rio por meio de planilhas no Excel, tais planilhas são definidas como:

- A primeira planilha apresentada pelo modelo no Excel é a **FórmulasCoefic**, uma planilha que contém todas as equações que são utilizadas para a modelagem, além dos valores usuais dos coeficientes que são utilizados nas equações da modelagem.
- A segunda planilha é a **DiagramaUnifilar**, essa planilha é utilizada para a descrição e o detalhamento do diagrama unifilar do recurso hídrico que estará sendo modelado.
- A terceira planilha é a **RioPrincipal**, tal planilha contém as características da modelagem do rio principal. Nessa planilha, é realizado os cálculos e obtido os resultados.
- E a quarta e última planilha é a planilha do **Tributário1**, a qual é opcional. Ela é utilizada nos casos que são feitos a modelagem de algum tributário do rio principal. Sendo assim, os resultados são obtidos na própria planilha e são transferidos para a planilha Rio Principal. Ressalta-se que podem existir quantas planilhas Tributário1 forem necessárias, variando conforme o número de tributários que se deseja modelar.

As principais equações cinéticas dos parâmetros da qualidade da água que são simuladas no modelo QUAL-UFMG, estão representadas no Quadro 1.

Quadro 1 - Equações cinéticas dos parâmetros da qualidade da água utilizado no modelo.

Parâmetro	Equação	Legenda
Oxigênio dissolvido	$dD/dt = -K_d.L + K_2 . D$	D= déficit de oxigênio dissolvido (mg.L <sup>-1</sup> ) t= tempo (d) K <sub>d</sub> = coeficiente de decomposição (d <sup>-1</sup> ) L= concentração de DBO remanescente (mg.L <sup>-1</sup> ) K <sub>2</sub> = coeficiente de reaeração (d <sup>-1</sup> )
Demanda Bioquímica de Oxigênio	$dL/dt = -K_d.L$	K <sub>d</sub> = coeficiente de decomposição da matéria orgânica L= concentração de DBO remanescente (mg.L <sup>-1</sup> )
Nitrogênio Total	$N_{tot} = N_{org} + N_{amon} + N_{nitri} + N_{nitra}$	N <sub>tot</sub> = concentração de nitrogênio total (mg.L <sup>-1</sup> ) N <sub>org</sub> = concentração de nitrogênio orgânico (mg.L <sup>-1</sup> ) N <sub>amon</sub> = concentração de nitrogênio amoniacal (mg.L <sup>-1</sup> ) N <sub>nitri</sub> = concentração de nitrito (mg.L <sup>-1</sup> ) N <sub>nitra</sub> = concentração de nitrato (mg.L <sup>-1</sup> )
Fósforo Orgânico	$dP_{org}/dt = -K_{oi} . P_{org} - K_{spo} . P_{org}$	P <sub>org</sub> = concentração de fósforo orgânico (mg.L <sup>-1</sup> ) K <sub>oi</sub> =coeficiente de conversão do fósforo orgânico a fósforo inorgânico (d <sup>-1</sup> ) K <sub>spo</sub> = coeficiente de sedimentação do fósforo orgânico (d <sup>-1</sup> )
Coliformes	$dN/dt = -K_b.N$	N= número de coliformes (NMP/100 mL); K <sub>b</sub> = coeficiente de decaimento de coliformes (d <sup>-1</sup> ); t= tempo (d)

Fonte: VON SPERLING, 2014 (adaptado).

### 3.2.1.1 Cinética do balanço de oxigênio

Os principais fenômenos interagentes da cinética do balanço de oxigênio dissolvido de corpos hídricos são a desoxidação e a reaeração. Esses dois fenômenos que proporcionam o balanço da concentração de oxigênio dissolvido são basicamente governadas pelo coeficiente de desoxigenação (K<sub>1</sub>) e pelo coeficiente de reaeração (K<sub>2</sub>) (ALMEIDA, 2006; VON SPERLING 2014).

A cinética da desoxidação está relacionada com os coeficiente de desoxigenação (K<sub>1</sub>), e o coeficiente de decomposição da DBO no rio (K<sub>d</sub>). O coeficiente K<sub>1</sub> depende das características da matéria orgânica, temperatura e da

presença de substâncias inibidoras, e constitui-se de um parâmetro de grande importância na modelagem do oxigênio dissolvido. O coeficiente  $K_d$  está relacionado com a incorporação da decomposição da matéria orgânica, através da biomassa suspensa na massa líquida e na biomassa no lodo de fundo do curso d'água (VON SPERLING, 2014). A tabela 1, apresenta valores típicos dos coeficientes  $K_1$  e  $K_d$  evidenciados na literatura.

Tabela 1 – Valores típicos dos coeficientes  $K_1$  e  $K_d$ .

Origem	$K_1$ (Laboratório)	$K_d$	
		Rios rasos	Rios profundos
Curso d'água recebendo esgoto bruto concentrado	0,35 - 0,45	0,50 – 1,00	0,35 – 0,50
Curso d'água recebendo esgoto bruto de baixa concentração	0,30 – 0,40	0,40 – 0,80	0,30 – 0,45
Curso d'água recebendo efluente primário	0,30 – 0,40	0,40 – 0,80	0,30 – 0,45
Curso d'água recebendo efluente secundário	0,12 – 0,24	0,12 - 0,24	0,12 – 0,24
Curso d'água com águas limpas	0,08 – 0,20	0,08 – 0,20	0,08 – 0,20

Fonte: Adaptado de FAIR et al. (1973) e ARCEIVALA (1981) citados por VON SPERLING (2014)

A reaeração atmosférica corresponde à absorção de oxigênio atmosférico, pode ser caracterizada como um processo de troca de oxigênio da interface ar-água. Sua taxa de absorção é expressa pelo coeficiente de reaeração ( $K_2$ ). O coeficiente de reaeração é altamente dependente das características geométricas do rio e de sua vazão, sendo frequentemente o principal fator responsável pela introdução de oxigênio no meio líquido (ALMEIDA, 2006; VON SPERLING, 2018). A tabela 2, apresenta valores típicos do coeficiente  $K_2$  evidenciados na literatura.

Tabela 2 - Valores típicos do coeficiente  $K_2$ 

Corpo d'água	$K_2$	
	Profundo	Raso
Pequenas lagoas	0,12	0,23
Rios vagarosos, grandes lagos	0,23	0,37
Grandes rios com baixas velocidades	0,37	0,46
Grandes rios com velocidade normal	0,46	0,69
Rios rápidos	0,69	1,15
Corredeiras e quedas d'água	> 1,15	> 1,61

Fonte: adaptado de FAIR et al. (1973) e ARCEIVALA (1981) citados por VON SPERLING (2014)

Dessa forma, no presente estudo os valores dos coeficientes  $K_1$ ,  $K_2$  e  $K_d$  foram determinados de acordo com as Tabelas 1 e 2 em conformidade com as características do Rio Jacuí no trecho estudado.

### 3.3.2 Levantamento de Dados

Para que a análise da autodepuração e qualidade da água do Rio Jacuí fosse realizada foi necessário o levantamento de dados, como parâmetros de qualidade de água (Oxigênio Dissolvido, Demanda Bioquímica de Oxigênio, Nitrogênio Total, Fósforo Orgânico e Coliformes), medidas de vazão, profundidade e características gerais do Rio.

Os parâmetros de qualidade da água do Rio Jacuí para alimentação do modelo foram disponibilizados pela FEPAM (Fundação Estadual de Proteção Ambiental), os quais podem ser consultados no Anexo A. A FEPAM realiza o monitoramento da qualidade da água do Rio Jacuí trimestralmente e interpreta os resultados conforme a Resolução do CONAMA nº 357/05, a qual estabelece o padrão de qualidade da água no meio ambiente em função do seu uso e destinação (FEPAM, 2019).

Os dados hidráulicos do Rio Jacuí foram obtidos por meio de documentos disponibilizados pelo comitê da bacia Baixo Jacuí e por meio do aplicativo HydroWeb, gerenciado pela Agência Nacional de Águas (ANA). O aplicativo é uma ferramenta integrante do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) e oferece o acesso ao banco de dados, reunindo dados de níveis fluviais, vazões, chuvas, climatologia, qualidade da água e sedimentos (ANA, 2018).

### **3.3.3 Caracterização do Entorno da Área de Estudo**

Para caracterização do entorno do trecho do rio primeiramente foi analisado a presença de fontes pontuais de poluição, por meio do navegador Google Earth, a fim de determinar e estimar os lançamentos de efluentes domésticos e com o auxílio do mapa de caracterização do uso e ocupação do solo apresentado no item 3.2.

Vale ressaltar que a caracterização do entorno da área de estudo é uma etapa importante no trabalho, pois possibilita a identificação das atividades predominantes de cada local para a realização de simulações de cenários mais próximo da realidade da área estudada.

### **3.4 Calibração do Modelo**

A calibração do modelo é uma etapa primordial no processo de modelagem que visa ajustar os dados observados (medidos) e dos dados estimados (calculado pelo modelo) por meio dos coeficientes do modelo QUAL-UFMG, ou seja, visa adequar os parâmetros das equações matemáticas à realidade física, química e biológica do rio estudado (VON SPERLING, 2014). A calibração do Modelo foi

realizado manualmente, ajustando os valores dos coeficientes dos modelos, conforme os dados disponíveis.

### 3.5 Simulação de Cenários

Para a análise da autodepuração do Rio, foi realizado a simulação de um cenário com o objetivo de realizar análises das prováveis e diferentes condições da área de estudo. Com isso, foi analisado as características do entorno do rio para que possíveis fontes de lançamentos de efluentes pontuais fossem identificadas, pois essas fontes contribuem diretamente com a qualidade da água do rio e podem contribuir diretamente na concentração de fósforo, nitrogênio, coliformes termotolerantes, OD e DBO do rio.

Neste contexto, foi escolhido um trecho do rio Jacuí que representasse a maior concentração de área urbana, de acordo com a Figura 5. Além disso, para escolha do trecho foi considerado os dados disponíveis pelas estações de monitoramento. Das três estações de monitoramento da qualidade da água da FEPAM dispostas no rio Jacuí na bacia Baixo Jacuí duas encontram-se no trecho escolhido.

Para estimar a vazão dos efluentes considerados no trecho foi utilizada a Eq. 7 proposta por Von Sperling (2014), com base na quantidade de efluente L/hab. dia.

$$Q_{\text{dméd}} = (\text{Pop. QPC.R}) / 1000 \quad \text{Eq. 7}$$

Onde:

$Q_{\text{dmed}}$  = vazão doméstica média de esgotos (m<sup>3</sup>/d)

QPC = quota per capita de água (L/hab.d)

R = coeficiente de retorno esgoto/água

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. Tratamento do Esgoto Sanitário dos Municípios Presentes na Bacia

Dos 40 municípios que fazem parte da Bacia Hidrográfica do Baixo Jacuí, 12 municípios estão 100% inseridos, 23 municípios estão inseridos entre 20% a 90% e apenas 5 municípios estão inseridos menos de 10% na bacia. Apesar de alguns municípios não terem seu território totalmente inserido na Bacia, alguns apresentam grande relevância no estudo quando comparados com outros municípios que estão totalmente inseridos, por possuírem uma maior área ou população. Um exemplo deste caso é o município de Caçapava do Sul que apesar de ter apenas 40,8 % do seu território presente na bacia, a maior parte da sua população, cerca de 68,87 %, está inserida na bacia. Na Tabela 3 é apresentado o levantamento do percentual e tipo de tratamento de esgoto.

Tabela 3 - Percentual e tipo de tratamento de esgoto presentes na Bacia do Baixo Jacuí

Municípios	Porcentagem na Bacia (%)	População estimada na Bacia	ETE	Esgotamento sanitário adequado* (%)
Agudo	100	16461	Não	68,1
Arroio do Ratos	100	14151	Não	68,4
Barão do Triunfo	74,5	5774	Não	29,2
Butiá	100	20941	Não	67,5
Caçapava do Sul	40,8	23158	Não	51,2
Cachoeira do Sul	91,45	81142	Sim	35,8
Candelária	47,06	7556	Não	66,3

\* Esgotamento sanitário adequado, residências que possuem o esgotamento sanitário do tipo rede geral e fossa séptica.

Tabela 3 - Percentual e tipo de tratamento de esgoto presentes na Bacia do Baixo Jacuí  
(CONTINUAÇÃO)

Cerro Branco	100	4691	Não	71
Charqueada	100	40789	Não	91,5
Dom Feliciano	27,12	3283	Não	32
Dona Francisca	100	3041	Não	53,6
Eldorado do sul	73,7	38282	Sim	90,4
Encruzilhada do Sul	40,29	17890	Não	63,7
Faxinal do Soturno	100	6677	Não	69,2
Paraíso do Sul	100	7611	Não	38,5
General Câmara	42,64	1441	Não	64,9
Ibarama	77,96	3668	Não	18,9
Ivorá	99,46	1903	Sim	75,3
Júlio de Castilhos	24,81	818	Não	47,3
Lagoa Bonita do Sul	98,11	2855	Não	27,9
Mariana Pimentel	54,33	1753	Não	55,5
Minas do Leão	100	8075	Não	71,9
Montenegro	5,08	369	Não	89,1
Nova Palma	100	6512	Não	57,3

\* Esgotamento sanitário adequado, residências que possuem o esgotamento sanitário do tipo rede geral e fossa séptica.

Tabela 3 - Percentual e tipo de tratamento de esgoto presentes na Bacia do Baixo Jacuí  
(CONTINUAÇÃO)

Novo Cabrais	100	4196	Não	55,3
Pantano Grande	100	9174	Sim	84
Passa Sete	9,44	484	Não	21,2
Passo do Sobrado	38,19	1929	Não	50,4
Pinhal Grande	22,08	1640	Não	65,5
Restinga Seca	27,66	1903	Não	40,6
Rio Pardo	77,82	26305	Não	77,3
Santa Cruz do Sul	1,97	311	Sim	90,3
Santana da Boa Vista	23,25	1039	Não	35,1
São Jerônimo	86,89	23504	Não	69,9
São João do Polêsine	50,47	1817	Não	5,6
Sertão Santana	9,16	473	Não	29,4
Silveira Martins	31,83	425	Não	43,3
Sobradinho	6,16	188	Não	73,5
Triunfo	69,67	17297	Não	57,8
Vale Verde	53,08	2285	Não	50,6
TOTAL	-	411812	-	56,36

\* Esgotamento sanitário adequado, residências que possuem o esgotamento sanitário do tipo rede geral e fossa séptica.

Conforme análise dos dados do IBGE (2019), a grande maioria dos municípios possuem fossa séptica e sumidouro como tratamento do esgoto sanitário, e apenas 3 municípios (Cachoeira do Sul, Eldorado do Sul e Ivorá) possuem uma Estação de Tratamento de Esgoto - ETE. Em média, 56,36 % dos municípios inseridos na bacia contam com esgotamento sanitário adequado (fossa séptica ou rede geral). Os outros 43,64 % são despejados inadequadamente e diretamente em um corpo receptor ou nas redes de drenagem pluvial. Apesar de 56,36% dos municípios apresentarem esgotamento sanitário adequado, vale ressaltar, que a fossa séptica não é suficiente para alcançar os padrões de lançamento de efluentes exigidos pela legislação, apenas reduz sua carga poluidora. A Resolução CONAMA nº 430/2011, que dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, prescreve que o tratamento dos efluentes deve remover 60% de DBO para o lançamento direto nos corpos receptores, e segundo o Von Sperling (2014) às fossas sépticas em média possuem eficiência de remoção de cerca de 30-35% de DBO.

Além disso, observa-se que a bacia hidrográfica Baixo Jacuí possui um total de 411.812 habitantes. Segundo a NBR 7229, em média uma pessoa gera 130 L de efluente doméstico por dia, ou seja, na bacia é gerado em torno de 53.535.560 L/dia. Dessa forma, o Rio Jacuí uns dos principais rios do Rio Grande do Sul, e o rio principal da bacia Baixo Jacuí, recebe boa parte dos efluentes gerados nela, seja de forma direta ou indireta pelos seus afluentes.

## **4.2 Classificação do Uso e Ocupação do Solo**

Na Tabela 4 pode-se observar a porcentagem das diferentes áreas encontradas para cada classe do uso e ocupação do solo na bacia Baixo Jacuí, o qual estão representadas como, área urbana, água, floresta, agricultura e solo exposto.

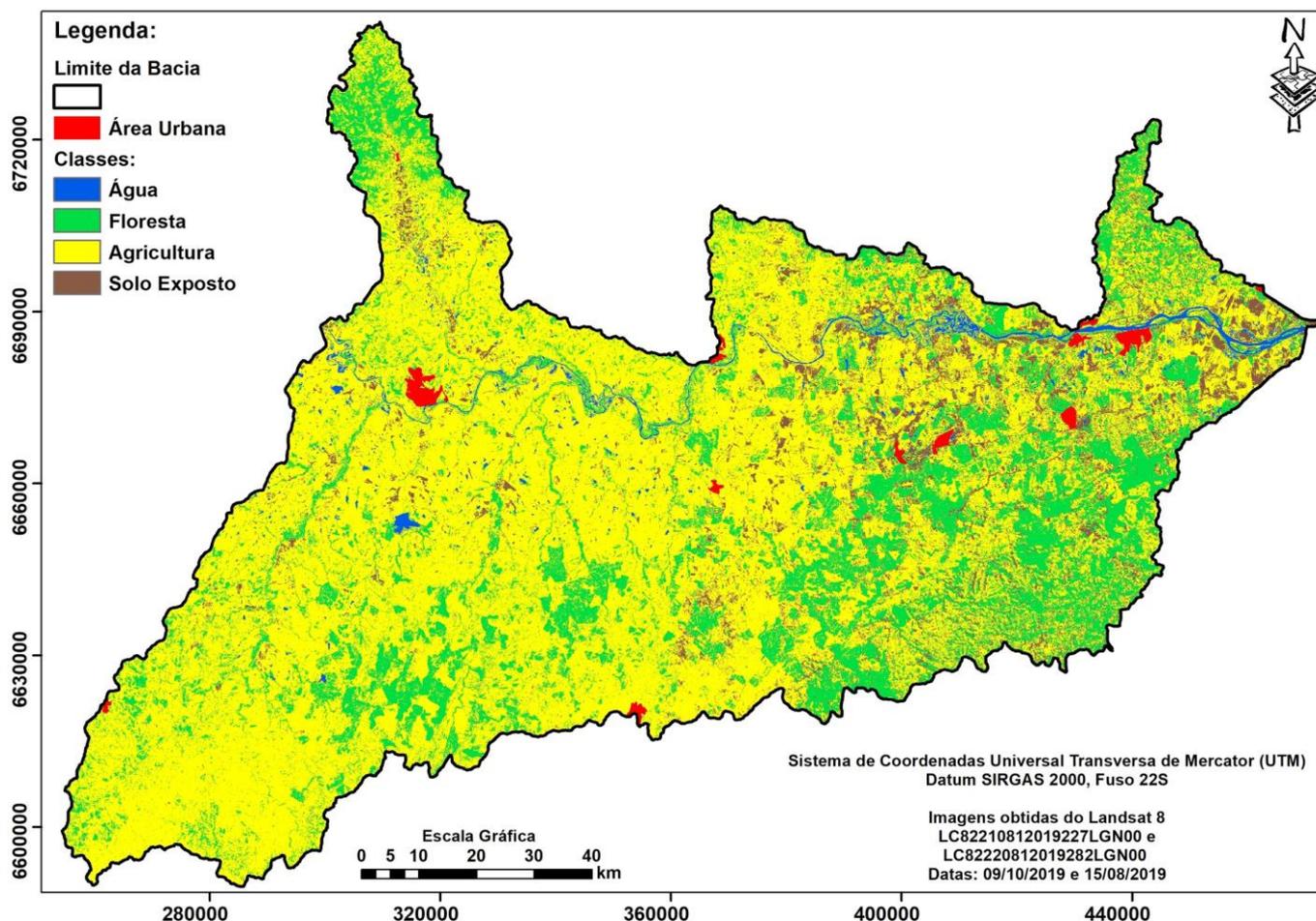
Tabela 4 - Percentual da área de classificação do uso e ocupação do solo na bacia Baixo Jacuí

Tipo de Uso	Área (%)
Água	1,58
Floresta	22,07
Agricultura	68,07
Solo exposto	7,67
Zona Urbana	0,62

Fonte: IBGE, 2010 (adaptado)

Nota-se nitidamente que a atividade predominante da bacia Baixo Jacuí é a agricultura. Conforme o mapa (Figura 5) e a Tabela 4, cerca de 68,07% da bacia é destinada para fins agrícolas. Vale ressaltar que o mapa foi construído com imagem de satélite dos meses de agosto/outubro, período que a atividade agrícola é intensa, principalmente o plantio de arroz, além dos plantios de soja, milho, feijão tabaco, entre outros. Neste período também há um grande consumo significativo de água para irrigação, em especial para as culturas de arroz e soja. Além disso, ressalta-se que nessas áreas ocorrem maior aporte de sedimento nos cursos d'água, o que pode provocar o assoreamento e diminuir a profundidade da rios e, conseqüentemente, comprometer os usos múltiplos da água (ZIANI, 2017).

Figura 5 - Mapa de uso e ocupação do solo da bacia Baixo Jacuí



Fonte: IBGE, 2010 (adaptado)

As áreas de floresta que representam 22,07 % da área total estão relacionadas com as áreas de floresta nativa, e as Áreas de Preservação Permanente (APP), esta que possui a função ambiental de preservar os recursos hídricos. Pode-se observar na Figura 5 que as áreas de floresta mais expressivas estão localizadas na região sudeste da bacia, onde encontra-se os municípios Barão do Triunfo, Butiá, Dom Feliciano, Encruzilhada do Sul, Mariana Pimentel, entre outros.

As áreas de solo exposto (7,67%) representam áreas onde a vegetação nativa foi retirada, característica das áreas de campo destinadas a pecuária e da extração de minérios o qual são intensos na região, como a extração de areia e carvão, que são responsáveis por diversos danos ambientais e benefícios socioeconômicos. Mais detalhes a respeito podem ser consultados nos trabalhos

de Telmo de Quadros (2017) e Luciano Machado (2015), onde o primeiro autor aborda detalhadamente os efeitos da extração de areia na erosão nas margens do rio Jacuí, já o segundo apresenta os benefícios socioeconômicos da extração de areia nos municípios.

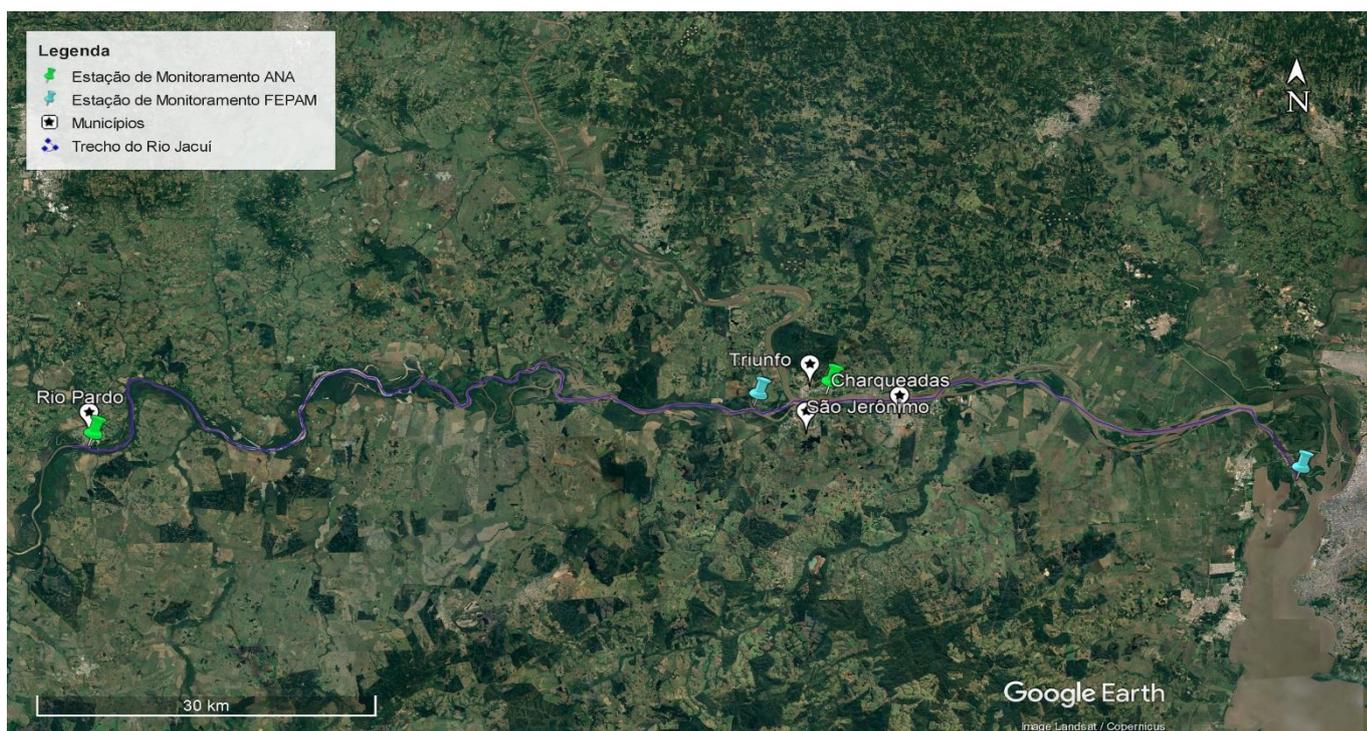
As áreas em vermelho na Figura 5 representam as áreas urbanas. Observa-se que a maioria delas estão localizadas próximas ao Rio Jacuí, isto é, essas áreas representam um grande potencial de lançamento de efluentes domésticos no rio e captação de água para o consumo humano.

### **4.3 Modelagem matemática da Autodepuração do Trecho do Rio Jacuí**

#### **4.3.1 Levantamento de dados**

Conforme a Figura 6, pode-se observar o trecho escolhido para a realização da modelagem o qual está inserido na bacia Baixo Jacuí, juntamente com os pontos das Estações Fluviométricas da ANA e as Estações de Monitoramento da Qualidade da Água da FEPAM. Conforme dados do Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Baixo Jacuí disponibilizados pela SEMA (2015), a vazão média do trecho é 1597,5 m<sup>3</sup>/s.

Figura 6 - Trecho do Rio Jacuí estudado e Estações de Monitoramento



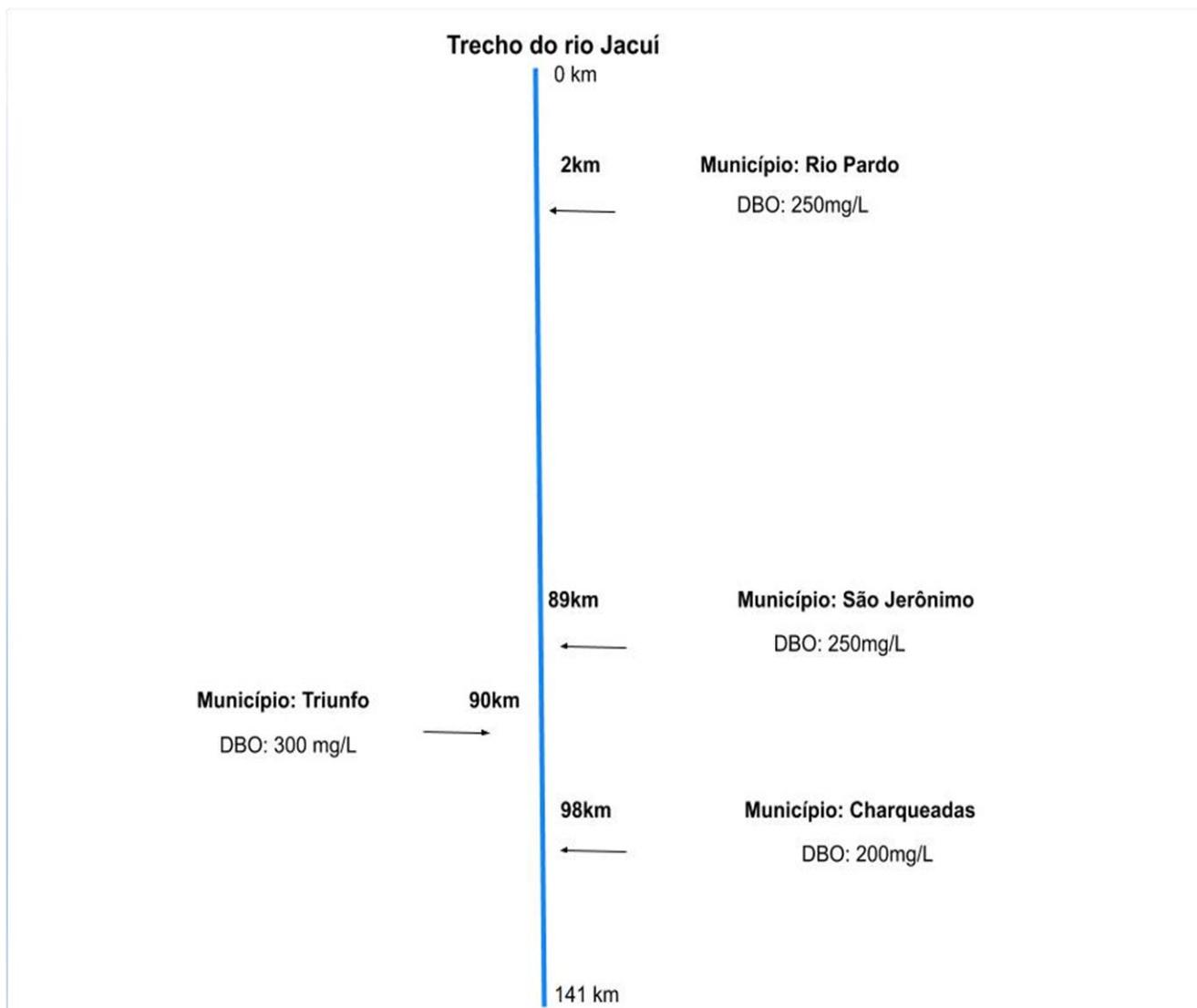
Fonte: Google Earth, 2019.

Pode-se observar também na Figura 6 os principais municípios fonte de cargas pontuais inseridos no trecho analisado, que são Rio Pardo, São Jerônimo, Triunfo e Charqueadas. Segundo o Plano Municipal de Saneamento Básico (2011) do município de Rio Pardo, há no município alguns pontos críticos com relação ao esgotamento sanitário, onde grande parte deles desembocam no Rio Jacuí. Já de acordo com o Plano Ambiental Municipal (2007) do município de Charqueadas estima-se que no município mais de 50% das residências possuem seus sistemas de esgotos cloacais ligados diretamente à rede de coleta pluvial, inviabilizando agressivamente a qualidade das águas dos arroios e do Rio Jacuí, os quais recebem estes efluentes. Além disso, na região o rio também é impactado por despejos do Polo Petroquímico de Triunfo e de inúmeras indústrias dos ramos químico, plástico, metal mecânico e siderúrgico, entre outras atividades (DE SOUZA, 2017).

### 4.3.2 Simulação de Cenário

Primeiramente, para a realização da modelagem do trecho do rio Jacuí, foram determinadas a distância do trecho do Rio e os efluentes simulados, conforme a Figura 7.

Figura 7. - Representação do Trecho do Rio Jacuí com as fontes pontuais e difusas



Fonte: Autora, 2019

Posteriormente, foram determinados os valores dos parâmetros cinéticos  $K_1$ ,  $K_2$  e  $K_d$  correspondentes a 0,35, 0,69 e 0,40 respectivamente, utilizados na alimentação do modelo. A determinação do  $K_1$  e  $K_d$  na Tabela 4 foi baseada nos resultados da estimativa de tratamento do esgoto sanitário dos municípios presentes na bacia (item 4.2). O rio Jacuí, no trecho estudado, classificou-se como

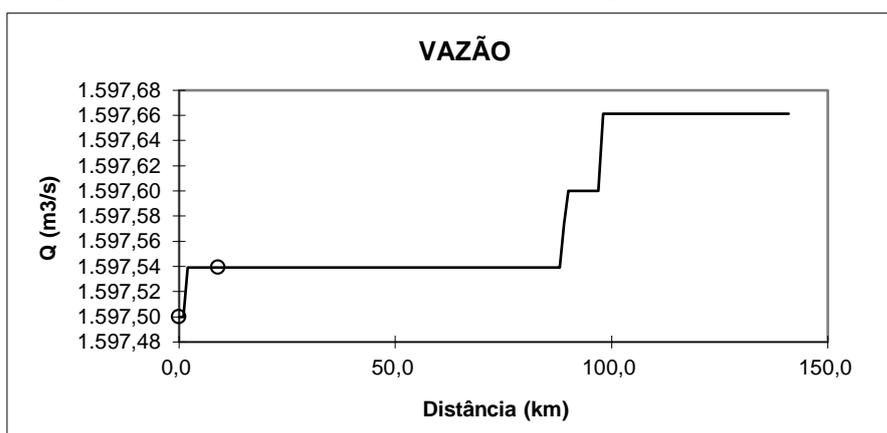
um curso d'água que recebe efluente primário, em razão de que mais de 50% dos municípios da bacia possuem tratamento de esgoto primário, e principalmente, devido os municípios costeiros possuírem de 57,8 a 91,5% tratamento de esgoto primário. Já a determinação do  $K_2$  foi baseada nas características hidráulicas do Rio Jacuí no trecho estudado.

As cargas pontuais dos municípios variam entre 200 mg/L e 300 mg/L. Segundo Von Sperling (2014), a faixa típica de concentração de  $DBO_5$  em um sistema de tratamento primário (tanques sépticos) variam entre 200-250 mg/L. Desse modo, o município de Charqueadas apresenta 91,5% do seu tratamento de efluente doméstico primário, sendo assim, o município possui o menor valor de  $DBO_5$  (200 mg/L). Em contrapartida, Triunfo possui o maior valor de  $DBO_5$  (300 mg/L) devido a menor porcentagem de tratamento de efluente primário dentre os municípios analisados, apenas 57,8 %.

#### 4.3.3 Resultados Modelagem

A Figura 8 apresenta o incremento de vazão ao longo do trecho simulado. A alteração da vazão ocorre devido a entrada dos efluentes ao longo do Rio.

Figura 8 – Valores incrementais da vazão ao longo do trecho estudado.



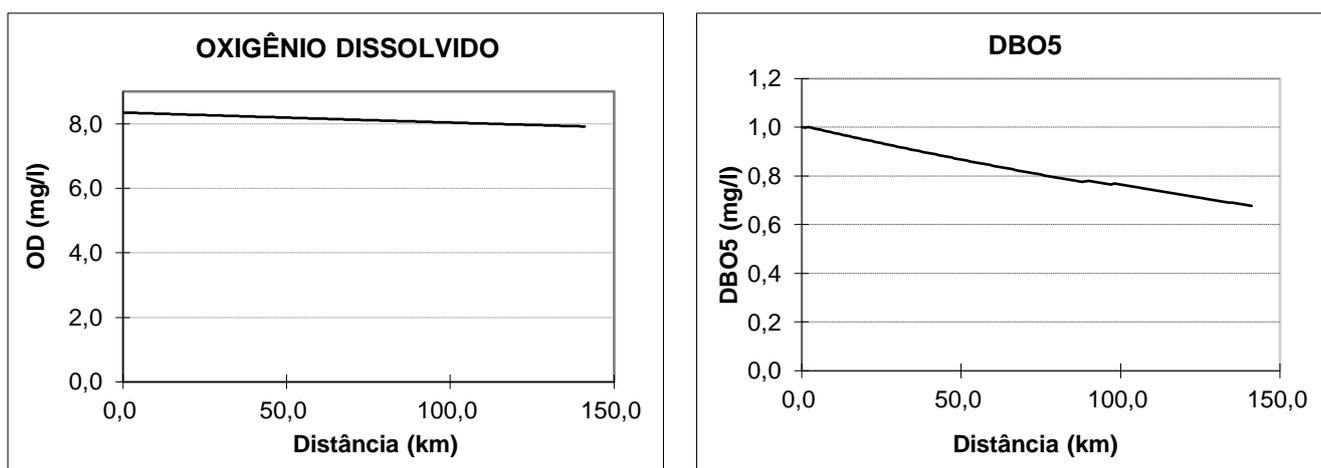
Fonte: Autora, 2019.

Na Figura 9 é apresentada as curvas dos parâmetros de OD e DBO ao longo do trecho estudado. Observa-se a influência da entrada de fontes de poluição na queda dos teores de OD. Apesar do decaimento da concentração de OD ocorrer, os valores não decaem a ponto de ultrapassar o limite mínimo de 6 mg/L

estabelecido pela a Resolução 357 do CONAMA. Após esse decaimento o oxigênio dissolvido do rio tende a voltar a se estabelecer ao longo do percurso, porém como há novas fontes de lançamento de efluentes ao longo do trecho, ele não volta ao seu valor inicial.

Da mesma forma, a concentração de DBO não ultrapassou o limite máximo permitido 3 mg/L conforme a Resolução CONAMA 357. Ressalta-se os baixos valores de DBO, o qual indicam uma ótima capacidade de autodepuração do rio Jacuí. A boa capacidade de autodepuração do rio Jacuí neste caso, pode ser verificada devido a não ocorrência de altos decaimentos de OD e nem altas concentrações de DBO, apesar da contribuição de efluentes domésticos dos municípios.

Figura 9 – Gráfico representativo da modelagem dos parâmetros de OD e DB



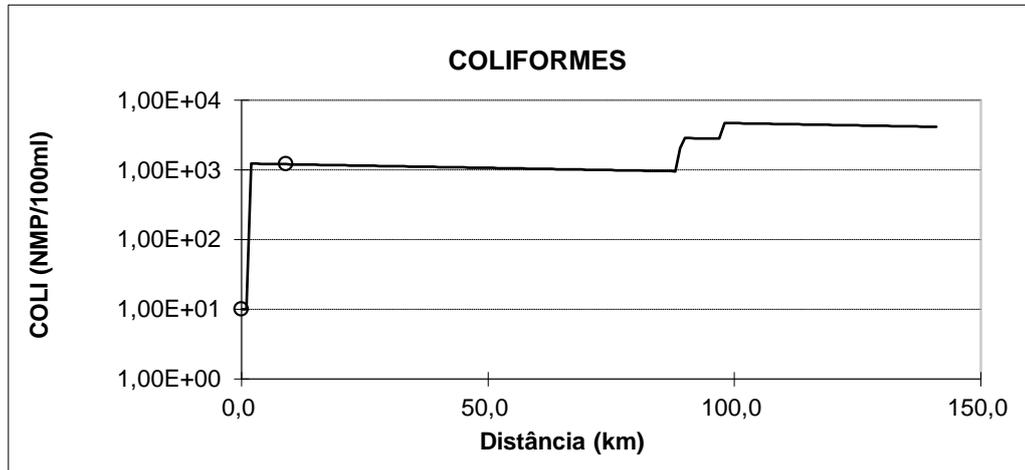
Fonte: Autora,2019.

Além disso, vale ressaltar que os valores apresentados de OD e DBO pelo modelo são condizentes com os dados disponíveis pela estação de monitoramento da FEPAM localizada na foz do rio Jacuí, indicando certa coerência dos dados da modelagem com os dados reais.

A curva dos coliformes está representada na Figura 10, na qual pode ser verificado que na medida que aumenta a distância do rio, a concentração dos coliformes aumenta. Este aumento na concentração se deve ao lançamento de efluente doméstico ao longo do rio. Nota-se que o aumento mais significativo dos coliformes ocorre entre 90 e 100 km, onde concentra-se os municípios de Triunfo,

São Jeronimo e Charqueadas. Desse modo, as concentrações dos coliformes estiveram acima de 200 NMP/100ml o máximo permitido pela Resolução CONAMA nº 357/05 para corpos de água classe 1.

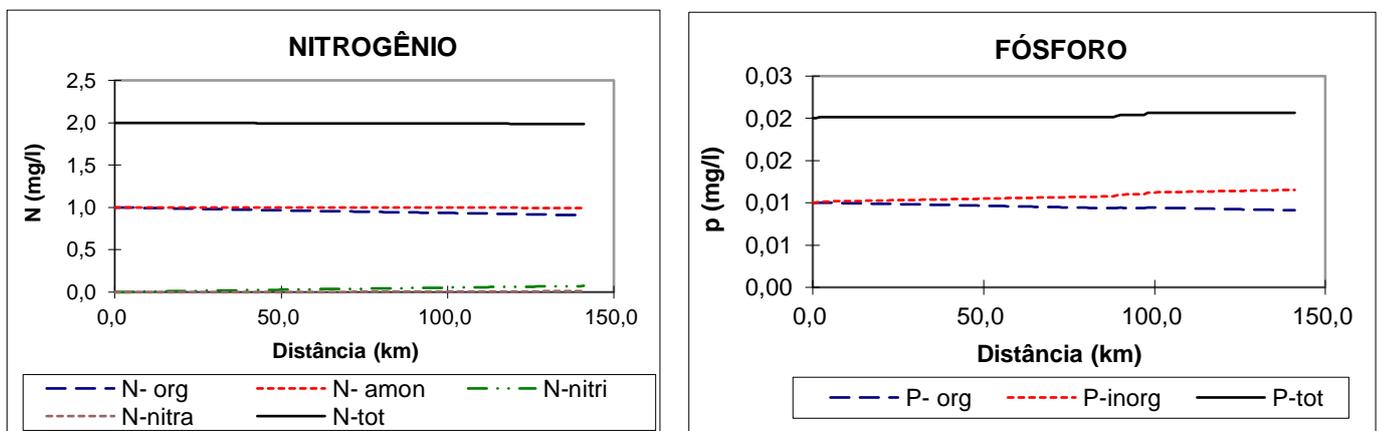
Figura 10 - Gráfico representativo da modelagem dos coliformes totais.



Fonte: Autora, 2019.

Com relação a modelagem do Fósforo e Nitrogênio, ambos valores estiveram dentro do limite estabelecido pela Resolução CONAMA nº 357/05 (Figura 11). Os valores de Nitrato, Nitrogênio e Nitrito amoniacal total estiveram dentro dos valores 10,0 mg/L.Ni 1,0 mg/L.N 3,7mg/L.N, respectivamente. E o valor de Fósforo total não ultrapassou o valor de 0,025 mg/L. P estabelecido pela legislação.

Figura 11 - Gráfico representativo da modelagem de Nitrogênio e Fósforo ao longo do trecho estudado.



Fonte: Autora, 2019.

De modo geral, as variáveis da qualidade da água do rio Jacuí estiveram dentro do padrão estabelecido conforme a Resolução CONAMA 357/05 para rios de classe 1. Porém vale ressaltar que a modelagem focou nas fontes pontuais de lançamento de efluente, e que a bacia é caracterizada pela grande atividade agrícola, e neste caso não foi considerado as fontes difusas, o qual possuem altos teores de nitrogênio e fósforo e que são bem expressivas na bacia.

Vale destacar também que o Rio Jacuí possui dois percursos diferentes em sua foz, os quais desembocam no Lago Guaíba. O primeiro percurso do Rio Jacuí não recebe contribuição dos rios - Rio dos Sinos, Caí e Gravataí; já o segundo recebe a contribuição desses. Este estudo concentrou-se no primeiro percurso que possui a estação de monitoramento de qualidade da água da FEPAM, o qual foi o último ponto da análise do trecho estudado. Segundo o IBGE (2013) os três rios mais poluídos do Rio Grande do Sul são os rios dos Sinos, o Gravataí e o Caí que, respectivamente, representam o 4º, 5º e 8º rios mais poluídos do Brasil.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A preservação da água para a realização das atividades é de extrema importância para evitar a deterioração da qualidade das águas e quadros de escassez. Dada à importância do assunto, torna-se necessário o desenvolvimento de múltiplos estudos para se conhecer as possíveis fontes de poluição dos nossos recursos hídricos e sua capacidade de autodepuração para que a deterioração da qualidade das águas sejam evitadas.

O desenvolvimento do presente estudo, de modo geral, possibilitou uma visão geral das atividades antrópicas desenvolvidas na bacia Baixo Jacuí e o potencial poluidor na mesma, como fontes pontuais e difusas de lançamento de efluentes. Além disso, o estudo permitiu a aplicação do modelo matemático QUAL-UFMG, uma importante ferramenta para o auxílio da gestão de recursos hídricos.

Desse modo, conclui-se que para a preservação das águas do Rio Jacuí há claramente a necessidade de investimentos e incentivos nas ações de planejamento do saneamento básico, principalmente na implantação de Estações de Tratamento de Esgotos - ETE nos municípios da região da bacia do Baixo Jacuí, uma vez que é gerado em torno de 53.535.560 L/dia de efluente doméstico na bacia e apenas 56,36 % dos municípios inseridos na mesma contam com esgotamento sanitário adequado. O lançamento de esgotos nos corpos hídricos sem o adequado tratamento tem resultado no comprometimento da qualidade da água, principalmente próximo às áreas urbanas, podendo impactar na saúde da população e até inviabilizar o atendimento de usos, especialmente o abastecimento humano.

Além disso, pode-se concluir que a Bacia do Baixo Jacuí possui atividade agrícola intensiva, o qual necessita de grande atenção dos órgãos ambientais, como fiscalização e medidas protetivas para que os recursos naturais da região sejam preservados, tendo em vista que a agricultura desempenha um papel fundamental na poluição de recursos hídricos e que representa 68,07% da atividade desenvolvida na bacia.

Ademais, o rio Jacuí aparentou uma boa capacidade de autodepuração, onde as variáveis da qualidade da água do trecho analisado estiveram dentro do padrão estabelecido conforme a Resolução CONAMA 357/05.

Por fim, ressalta-se a importância do uso da ferramenta utilizada na simulação dos processos de transporte e autodepuração de um rio na Engenharia Ambiental, pois avaliar e antecipar alterações na qualidade das águas de um corpo receptor de descargas poluentes e contaminantes é indispensável na preservação dos recursos hídricos.

## 6. REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **A Evolução da Gestão dos Recursos Hídricos no Brasil**. Brasília - DF, 2002.

\_\_\_\_\_. **Panorama das Águas: Quantidade de Água**, 2017. Disponível em: <<https://www.ana.gov.br/panorama-das-aguas/quantidade-da-agua>> Acesso: Abril, 2019.

\_\_\_\_\_. **Panorama das Águas: Água no Mundo**, 2018. Disponível em: <<https://www.ana.gov.br/panorama-das-aguas/agua-no-mundo/agua-no-mundo>> Acesso em: Abril, 2019.

\_\_\_\_\_. **HidroWeb: Séries Históricas**, 2018. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br/default.asp>> Acesso: Maio 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES AQUAVIÁRIOS - ANTAQ. **Relatório Executivo Bacia do Sul**. Rio Grande do Sul- RS, 2013.

ALMEIDA, T. V. D. Índice de qualidade da água e coeficientes de autodepuração de trechos do rio pomba. 2006. 68f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7229: projeto, construção e operação de sistemas de tanques sépticos: procedimento**, 1993.

ÁVILA, Lauren Cortezia. **Modelagem da qualidade da água utilizando coeficientes bibliográficos e experimentais – aplicação ao Rio Vacacaí Mirim.** Dissertação (mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 99 p., 2014.

BORGES, Luís Antônio Coimbra; DE REZENDE, José Luiz Pereira; PEREIRA, José Aldo Alves. **Evolução da legislação ambiental no Brasil.** Revista em Agronegócio e Meio Ambiente, v. 2, n. 3, p. 447-466, 2009.

BOWIE, George L. et al. **Rates, Constants, and Kinetics Formulations in surface water quality modeling.** 2 ed. Georgia, 1985, 455 p.

BRAGA, Benedito. **Introdução à engenharia ambiental.** 2ª edição. São Paulo: Person Prentice Hall, 2005.

BRANCO, Otavio Eurico de Aquino. **Avaliação da disponibilidade hídrica: conceitos e aplicabilidade.** Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, 2006.

BRASIL, Lei das Águas. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. **Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos.** Brasília – DF 1997.

\_\_\_\_\_. Lei nº 9.984 de 6 de julho de 2000. Dispõe sobre a criação da Agência Nacional de Águas - ANA para criação de normas de referência nacionais para a regulação da prestação dos serviços públicos de saneamento básico. Brasília – DF: MMA, 2000.

\_\_\_\_\_. LEI Nº 11.445, DE 5 DE JANEIRO DE 2007. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico. Brasília – DF: MMA, 2007.

BRASIL, Trata. **Saiba Porque o Saneamento é Básico, 2019**. Disponível em: <<http://www.tratabrasil.org.br/saneamento/o-que-e-saneamento>> Acesso em: outubro, 2019.

CAMPOS, J. L. et al. **Nitrification at high ammonia loading rates in an activated sludge unit**. Bioresource Technology, v. 68, n. 2, p. 141-148, 1999.

CHARQUEADA, Prefeitura Municipal. Plano Ambiental Municipal, 2007. Disponível em: <<http://comuma.com/ppplano/Volume%201.pdf>> Acesso: Outubro, 2019.

CIESP. IBGE apresenta ranking dos 10 rios mais poluídos do Brasil. 2013. Disponível em: Acesso em Outubro, 2019.

CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE – CONAMA. **Resolução Conama nº 357, de 17 de março de 2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Brasília -DF: MMA, 2005.

\_\_\_\_\_. **Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011**. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Brasília, DF, 2011.

CONSULTORIA LEGISLATIVA. **Recursos Hídricos - Conceituação, Disponibilidade e Usos**. Câmara dos Deputados, Brasília- DF, 2004.

COX, B. A. **A review of dissolved oxygen modelling techniques for lowland rivers**. *Science of the Total Environment*, v. 314, p. 303-334, 2003.

DEÁK, Csaba. **À busca das categorias da produção do espaço**. São Paulo: Tese de Livre Docência, FAU-USP, 2001.

DE QUADROS, Telmo Fernando Perez. **Efeito Da Dinâmica Fluvial e da Ação Antrópica Sobre a Erosão de Margens Fluviais: O Caso da Mineração de Areia No Rio Jacuí**. *Revista de Ciências Ambientais*, v. 11, n. 1, p. 49-64, 2017.

DE SOUZA, Fernando. **O Rio Jacuí e o Seu Famoso Delta**, 2017. Disponível em: <https://ferdinandodesousa.com/2017/10/13/o-rio-jacui-e-o-seu-famoso-delta/>  
Acesso em: Outubro, 2019.

FEPAM (Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler-RS). **Qualidade Ambiental: Qualidade das Águas da Bacia Hidrográfica do Rio Jacuí**. Disponível em: <http://www.fepam.rs.gov.br/qualidade/guaiba.asp> > Acesso em: Maio, 2019.

\_\_\_\_\_. **Qualidade Ambiental: Região hidrográfica do Guaíba**. Disponível em: [http://www.fepam.rs.gov.br/qualidade/qualidade\\_jacui/jacui.asp](http://www.fepam.rs.gov.br/qualidade/qualidade_jacui/jacui.asp) > Acesso em: Maio, 2019.

FIA, Ronaldo et al. **Qualidade da água de um ecossistema lótico urbano**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 20, n. 2, p. 267-275, 2015.

FLECK, Leandro; TAVARES, Maria Hermínia Ferreira; EYNG, Eduardo. **Especificidades e importância de modelos matemáticos de qualidade da água**. REVISTA EIXO, v. 2, n. 1, p. 106-119, 2013.

FONSECA, Wagner Cleyton. **Ajuste do Modelo QUAL2K e simulação de cenários para o Ribeirão Claro**. São Paulo, 2008.

FRAGOSO JR, Carlos Ruberto; FERREIRA, Tiago Finkler; DA MOTTA MARQUES, David. **Modelagem ecológica em ecossistemas aquáticos**. Oficina de textos, 2009.

GIL, Wagner. **A importância da Lei de Uso e Ocupação do Solo e o Plano Diretor**, 2015. Disponível em: <http://blogdowagnergil.com.br/vs1/2015/02/02/artigo-a-importancia-da-lei-de-uso-e-ocupacao-do-solo-e-o-plano-diretor/> Acesso: outubro, 2019.

GOMES, Sara Helena Raupp et al. **Modelagem sazonal da qualidade da água do Rio dos Sinos/RS utilizando o modelo QUAL-UFMG**. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 23, n. 2, 2018.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. **Área da unidade territorial: Área territorial brasileira**. Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/panorama>> Acesso: Setembro, 2019.

\_\_\_\_\_. **Esgotamento sanitário adequado: Ministério do Planejamento, Desenvolvimento e Gestão.** Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/panorama>> Acesso: Setembro, 2019.

\_\_\_\_\_. **População estimada: Diretoria de Pesquisas, Coordenação de População e Indicadores Sociais, Estimativas da população residente.** Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/panorama>> Acesso: Setembro, 2019.

KRAUS, Jane Elizabeth. **O que é fotossíntese?** Construindo sempre: aperfeiçoamento de professores PEB II-módulo 2, São Paulo: Secretaria de Estado da Educação, 2003, p. 28- 39.

LEONETI, Alexandre Bevilacqua; DO PRADO, Eliana Leão; DE OLIVEIRA, Sonia Valle Walter Borges. **Saneamento básico no Brasil: considerações sobre investimentos e sustentabilidade para o século XXI.** Revista de Administração Pública-RAP, v. 45, n. 2, p. 331-348, 2011.

MACHADO, Luciano Franco. **Uma abordagem socioambiental da atividade de extração de areia do Rio Jacuí-RS.** 2015.

MARGULIS, Lynn; SCHWARTZ, Karlene V. **Cinco Reinos: um guia ilustrado dos filios da vida na Terra.** Editora Guanabara Koogan, 2001.

MENEZES, João Paulo Cunha de et al. **Correlation between land use and groundwater quality.** Engenharia Sanitaria e Ambiental, v. 19, n. 2, p. 173-186, 2014.

\_\_\_\_\_. **Relação entre padrões de uso e ocupação do solo e qualidade da água em uma bacia hidrográfica urbana.** *Eng. Sanit. Ambient.* [online]. 2016, vol.21, n.3, pp.519-534. ISSN 1413-4152.

METCALF & EDDY. **Wastewater Engineering Treatment and Resource Recovery.** 5.ed, McGraw-Hill, New York, 2014.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - **Recursos Hídricos: Plano Nacional de Recursos Hídricos.** Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/agua/recursos-hidricos/plano-nacional-de-recursos-hidricos>> Acesso: Maio, 2019.

NUNES, Daniele Gonçalves. Modelagem da autodepuração e qualidade da água do rio Turvo Sujo. **Universidade Federal de Viçosa. Dissertação de Mestrado**, 2008.

DE OLIVEIRA FILHO, Antônio Alves; NETO, Iran Eduardo Lima. **Modelagem da qualidade da água do rio Poti em Teresina (PI).** Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 23, n. 1, 2018.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE - OMS. **Estimativas globais de água, saneamento e higiene para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável,** 2017. Disponível em: <<https://www.unicef.org/angola/comunicados-de-imprensa/21-bilh%C3%B5es-de-pessoas-n%C3%A3o-t%C3%AAm-acesso-%C3%A1gua-pot%C3%A1vel-em-casa-e-mais-do-dobro>> Acesso: Abril, 2019.

PESSOA, M. L. **Clima do RS - Atlas FEE**. Porto Alegre: FEE, 2017. Disponível em: <<http://atlas.fee.tche.br/rio-grande-do-sul/socioambiental/clima/>>. Acesso em: 9 de novembro de 2019.

RIO PARDO, Prefeitura Municipal. Plano Municipal de Saneamento Básico, 2011. Disponível em: <[https://www.riopardo.rs.gov.br/arquivos/00\\_pmsb\\_rio\\_pardo\\_1\\_290\\_parte01.pdf](https://www.riopardo.rs.gov.br/arquivos/00_pmsb_rio_pardo_1_290_parte01.pdf)> Acesso: Outubro, 2019.

ROGERS, Peter P.; LLAMAS, M. Ramón; CORTINA, Luis Martinez. **Water crisis: myth or reality?** CRC Press, 2005. 331p.

SALLA, Marcio Ricardo et al. **Estudo da autodepuração do Rio Jordão, localizado na bacia hidrográfica do Rio Dourados**. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 18, n. 2, p. 105-114, 2013.

SCHMIDT, Ingo et al. **New concepts of microbial treatment processes for the nitrogen removal in wastewater**. FEMS microbiology reviews, v. 27, n. 4, p. 481-492, 2003.

SECRETARIA ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE - SEMA. **Relatório Anual Sobre a Situação dos Recursos Hídricos no Estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre-RS, 2008.

\_\_\_\_\_. **Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Baixo Jacuí**. Relatório Executivo, Rio Grande do Sul, 2015.

\_\_\_\_\_. **Recursos Hídricos e Saneamento: Bacias Hidrográficas.** Disponível em: <<https://www.sema.rs.gov.br/g070-bacia-hidrografica-do-baixo-jacui>> Acesso: Maio, 2019.

SILVEIRA, Alexandre; GIORGETTI, Marcius Fantozzi. **Desenvolvimento de metodologia para determinação do coeficiente de transferência térmica na interface água-ar.** 1999.

STREETER, H. W.; PHELPS, E. B. A study of the natural purification of the Ohio River. Washington: US Public Health Service, 1925. 75 p. **Public health bulletin**, v. 146.

TERCINI, João Rafael Bergamaschi. **Modelagem da qualidade da água integrando rio e reservatório.** Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2014.

TONON, Kesse. **Modelagem da Qualidade da Água utilizando os Modelos Streeter-Phelps e QUAL-UFMG na Bacia do Rio Lambari – Poços de Caldas (MG).** Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental). Universidade Federal Alfenas, Minas Gérias. 168 p. 2014.

TUCCI, Carlos EM. **Modelos Hidrológicos.** Porto Alegre, Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1998.

TUNDISI, José Galizia; TUNDISI, Takako Matsumura. **Limnologia.** São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 631p.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. USGS. Landsat 8 cenas LC82210812019227LGN00 e LC82220812019282LGN00, USGS, Sioux Falls. Disponível em: <http://earthexplorer.usgs.gov/>. Acessado em: 30 de out. 2019.

VON SPERLING, Marcos. **Estudos e modelagem da qualidade da água de rios**. 2.ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais, 2014.

\_\_\_\_\_. **Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos**. 4.ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais, 2018.

YUSTIANI, Yonik Meilawati et al. Influencing Parameter of Self Purification Process in the Urban Area of Cikapundung River, Indonesia. **International Journal**, v. 14, n. 43, p. 50-54, 2018.

ZIANI, Patrícia; FOLETO, Eliane Maria; WOLLMANN, Cássio Arthur. **Análise e Caracterização Geográfica da Bacia Hidrográfica do Alto Jacuí/RS**. *Ciência e Natura*, v. 39, p. 58-74, 2017.

ZUBAIDAH, Tien; KARNANINGROEM, Nieke; SLAMET, Agus. **The Self-Purification Ability in The Rivers of Banjarmasin, Indonesia**. *Journal of Ecological Engineering*, v. 20, n. 2, p. 177-182, 2019.

## 7. ANEXOS

### ANEXO A - Dados de qualidade da água do Rio Jacuí para alimentação disponibilizados pela FEPAM

Bacia Hidrográfica	Recurso hídrico	Data coleta	Chuva 24h	DBO ( mg DBO5,20/L)	<i>E. coli</i> ( NMP/100mL)	Ortofosfato ( mg PO4- P/L)	Fósforo total ( mg P/L)	Nitrato ( mg NO <sup>3</sup> -N/L)	N amoniacal ( mg NH <sup>3</sup> -N/L)	N Kjeldahl ( mg N/L)	OD ( mg OD/L)	Prof. total ( m)	Temp. água ( °C)	Temp. ar ( °C)
Lago Guaíba	Rio Jacuí	09/05/2016	NÃO	1	73	0,075	0,129	prejudicada	0,286	prejudicada	8,49	3,3	17,9	22,0
Lago Guaíba	Rio Jacuí	18/08/2016	NÃO	1	435	0,032	0,096	prejudicada	< 0,064	prejudicada	9,08	2,5	16,8	15,0
Lago Guaíba	Rio Jacuí	09/11/2016	NÃO	1	93	0,104	0,199	0,3	0,071	0,571	7,02	3,0	22,4	23,0
Lago Guaíba	Rio Jacuí	09/02/2017	NÃO	2	33	0,053	0,057	prejudicada	< 0,064	1,390	7,32	2,2	29,4	26,9
Lago Guaíba	Rio Jacuí	09/05/2017	NÃO	2	238	0,064	0,095	prejudicada	< 0,064	< 0,162	8,45	2,1	20,2	20,6
Lago Guaíba	Rio Jacuí	09/08/2017	SIM	2	22	prejudicada	0,059	prejudicada	1,370	1,370	6,81	2,2	17,5	16,6
Lago Guaíba	Rio Jacuí	16/11/2017	NÃO	6	326	0,043	0,115	prejudicada	0,188	0,624	7,69	2,0	prejudicada	24,2
Lago Guaíba	Rio Jacuí	15/02/2018	NÃO	1	27	prejudicada	0,120	prejudicada	0,140	0,841	7,15	1,9	26,8	24,5
Lago Guaíba	Rio Jacuí	17/05/2018	SIM	1	50	0,054	0,082	prejudicada	0,121	1,290	7,96	2,3	21,3	17,7
Lago Guaíba	Rio Jacuí	16/08/2018	NÃO	1	48	0,050	0,062	prejudicada	0,153	0,902	9,86	prejudicada	15,1	15,0
Lago Guaíba	Rio Jacuí	14/11/2018	SIM	prejudicada	436	prejudicada	0,078	prejudicada	0,113	0,230	7,57	prejudicada	25,0	24,5

Recurso hídrico	Data coleta	Chuva 24h	DBO ( mg DBO5,20/L)	<i>E. coli</i> ( NMP/100mL)	Ortofosfato ( mg PO4- P/L)	Fósforo total ( mg P/L)	Nitrato ( mg NO <sup>3</sup> -N/L)	N amoniacal ( mg NH <sup>3</sup> -N/L)	Nitrogênio Kjeldahl ( mg N/L)	OD ( mg OD/L)	Prof. total ( m)	Temp. água ( °C)	Temp. ar ( °C)
Rio Jacuí	24/07/2017	NÃO	1	10	0,070	0,070	prejudicada	0,010	< 0,162	10,40	1,0	15,5	16,0
Rio Jacuí	23/10/2017	NÃO	2	144	0,062	0,099	prejudicada	0,183	1,400	7,01	1,0	14,6	20,6
Rio Jacuí	15/01/2018	SIM	2	195	prejudicada	prejudicada	prejudicada	< 0,1620	1,380	7,19	0,7	28,8	27,2
Rio Jacuí	16/04/2018	NÃO	1	6	0,051	0,081	prejudicada	0,207	1,040	8,22	1,0	24,0	23,0
Rio Jacuí	16/07/2018	SIM	1	144	0,055	0,084	prejudicada	< 0,064	1,950	10,15	prejudicada	14,7	15,8
Rio Jacuí	16/10/2018	NÃO	2	34	0,087	0,105	prejudicada	0,135	0,804	7,84	prejudicada	20,8	20,0