

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL  
CURSO ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

Georgea Gabriella da Silva

O Fósforo nas Estações de Tratamento de Efluentes de Florianópolis - Situação atual e  
perspectivas futuras

Florianópolis

2023

Georgea Gabriella da Silva

O Fósforo nas Estações de Tratamento de Efluentes de Florianópolis - Situação atual e perspectivas futuras

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental.  
Orientador: Prof., Dr. Nelson Libardi Junior.

Florianópolis

2023

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

SILVA, Georgea Gabriella

O Fósforo nas Estações de Tratamento de Efluentes de Florianópolis - Situação atual e perspectivas futuras / Georgea Gabriella SILVA ; orientador, Nelson Libardi Junior, 2023.

66 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2. Fósforo, nutrientes, esgoto sanitário, ETE, recuperação de recursos. I. Libardi Junior, Nelson . II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental. III. Título.

Georgea Gabriella da Silva

O Fósforo nas Estações de Tratamento de Efluentes de Florianópolis - Situação atual e  
perspectivas futuras

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental” e aprovado em sua forma final pelo Curso Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Florianópolis, 28 de Novembro de 2023.

---

Prof. Bruno Segalla Pizzolatti, Dr.  
Coordenador do Curso

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Nelson Libardi Junior, Dr.  
Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof.<sup>a</sup> Maria Elisa Magri, Dra.  
Avaliadora  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Rodrigo de Almeida Mohedano, Dr.  
Avaliador  
Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado aos meus pais, aos meus avós e a natureza.

## **AGRADECIMENTOS**

Quero agradecer de coração aos meus pais, Nilson e Karla, cujo apoio incondicional e amor foram a base essencial para que eu alcançasse esta oportunidade incrível. Sem eles, nada disso seria possível.

Ao meu querido namorado Ismail, agradeço por estar ao meu lado, por me apoiar nos momentos desafiadores e por ser a inspiração que impulsiona minha jornada.

Aos meus respeitados professores, em especial ao Professor Nelson. Sua competência e inteligência foram fundamentais para orientar o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus colegas, agradeço pela parceria e cumplicidade ao longo dessa jornada acadêmica. Juntos, enfrentamos desafios e celebramos conquistas.

Foco e coragem foram os pilares que me guiaram para vencer essa etapa.

Que venham as próximas!

## RESUMO

Este trabalho teve como objetivo estudar o fluxo do fósforo contido no esgoto sanitário das estações de tratamento de efluentes (ETE) de Florianópolis. Apesar de ser um elemento essencial, o fósforo em quantidades excessivas é o principal causador da eutrofização, provocando impactos irreversíveis aos ecossistemas aquáticos. Neste contexto foram estimadas as cargas de fósforo dispostas no meio ambiente, através do balanço de massa. Para isso, realizou-se um levantamento de informações, referentes ao período de 2019 a 2022, na base de dados dos sistemas nacionais de informações sobre saneamento e recursos hídricos, sobre as tecnologias utilizadas, as vazões de contribuição e as eficiências de remoção de fósforo associadas ao tipo de tratamento empregado em cada ETE. O estudo constatou que aproximadamente 10 toneladas de fósforo entram nas ETE em Florianópolis a cada mês, sendo que 8 toneladas são removidas na forma de fração sólida (lodo) enquanto 2 toneladas permanecem na fração líquida. A partir destas informações foram propostas alternativas para a remoção do fósforo e sua reutilização como subprodutos aplicados à agricultura. Conclui-se que a adoção de estratégias inovadoras no contexto da recuperação de recursos, pode reduzir significativamente o aporte de cargas de nutrientes lançados aos meio ambiente, contribuindo com a circularidade e mitigação dos impactos ambientais dessa prática. Além disso, refletem a aplicação do conceito de economia circular, integrando o tratamento de efluentes, a produção de alimentos e o setor energético. Essa implementação promove práticas agrícolas mais sustentáveis e representa uma solução ambiental que auxilia a gestão eficiente dos resíduos potencialmente poluidores das ETE, contribuindo para a construção de um futuro mais sustentável na região.

**Palavras-chave:** Fósforo, nutrientes, esgoto sanitário, ETE, recuperação de recursos.

## ABSTRACT

This study aimed to investigate the phosphorus flow within the sanitary sewage of wastewater treatment plants (WTP) in Florianópolis. Despite being an essential element, excessive phosphorus is the primary cause of eutrophication, leading to irreversible impacts on aquatic ecosystems. In this context, phosphorus loads discharged into the environment were estimated through mass balance. Information gathered from 2019 to 2022 in the national databases on sanitation and water resources systems included data on technologies employed, contribution flow rates, and phosphorus removal efficiencies associated with the treatment type at each WTP. The study found that approximately 10 tons of phosphorus enter the WTP in Florianópolis each month, with 8 tons being removed in the form of solid fraction (sludge) and 2 tons remaining in the liquid fraction. Based on these findings, alternative approaches for phosphorus removal and its reuse as by-products in agriculture were proposed. It is concluded that adopting innovative strategies in the context of resource recovery can significantly reduce nutrient loads released into the environment, contributing to the circularity and mitigation of environmental impacts. Moreover, these approaches align with the principles of circular economy, integrating wastewater treatment, food production, and the energy sector. This implementation promotes more sustainable agricultural practices, representing an environmental solution that aids in the efficient management of potentially polluting residues from WTP, thus contributing to the development of a more sustainable future in the region.

**Keywords:** Phosphorus, nutrients, wastewater, WTP, resource recovery.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática do processo de remoção de fósforo. ....	23
Figura 2 – Fluxograma Metodológico. ....	38
Figura 3 – Mapa de Localização do município de Florianópolis. ....	40
Figura 4 - Interface do Painel do Saneamento em pesquisa sobre Atenção ao Fósforo. ....	43
Figura 5 - Formas de esgotamento sanitário e domicílios atendidos. ....	45
Figura 6 - Mapeamento Das Estações De Tratamento Existentes No Município E Suas Tecnologias. ....	46
Figura 7 – Concentração Média de Fósforo nas ETE. ....	50
Figura 8 – Estimativas das Cargas de Fósforo. ....	51
Figura 9 – Carga de Fósfor Diária nas ETE. ....	52
Figura 10 - Carga de Fósforo nas ETE em um mês. ....	53
Figura 11 - Carga de Fósforo nas ETE em um ano. ....	53
Figura 12 - Economia Circular proposta para Florianópolis. ....	56

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Característica químicas do Fósforo.....	20
Quadro 2 - Comparação dos Processos de Remoção de Fósforo .....	32
Quadro 3 - Processos de Remoção de Fósforo, Eficiências e Sistemas Aplicáveis .....	33
Quadro 4 - Dados específicos sobre o saneamento básico em Florianópolis.....	44
Quadro 5 - Dados sobre as ETE de Florianópolis. ....	48

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Dados extraídos do Atlas Esgotos 2019 e cálculos realizados.....	65
Tabela 2 - Dados extraídos do Atlas Esgotos 2019 e cálculos realizados.....	66

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ETE - Estações de Tratamento de Efluentes

PROSAB - Programa de Pesquisa em Saneamento Básico

PLANSAB - Plano Nacional de Saneamento Básico

CONSEMA - Conselho Estadual do Meio Ambiente

OMS - Organização Mundial de Saúde

ADP - Difosfato de Adenosina

ATP - Trifosfato de Adenosina

PHA - Polihidroxicarboxilatos

SNIRH - Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1	OBJETIVOS .....	17
<b>1.1.1</b>	<b>Objetivo Geral.....</b>	<b>17</b>
<b>1.1.2</b>	<b>Objetivos Específicos .....</b>	<b>17</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>18</b>
2.1	FÓSFORO NA NATUREZA .....	18
2.2	FÓSFORO NO EFLUENTE DOMÉSTICO .....	19
2.3	LANÇAMENTO DE EFLUENTES EM CORPOS D'ÁGUA .....	20
2.4	PRINCÍPIOS E PROCESSOS PARA REMOÇÃO DE FÓSFORO EM ETE. ....	22
<b>2.4.1</b>	<b>Princípios da Remoção Biológica de Fósforo – Bidesfosfatação .....</b>	<b>24</b>
2.4.1.1	<i>Remoção de Fósforo por Macrófitas.....</i>	<i>26</i>
2.4.1.2	<i>Remoção de Fósforo por Microalgas.....</i>	<i>27</i>
<b>2.4.2</b>	<b>Remoção de Fósforo por processos Físico-Químicos.....</b>	<b>28</b>
2.4.2.1	<i>Remoção de Fósforo por Adsorção .....</i>	<i>28</i>
2.4.2.2	<i>Remoção de Fósforo por Precipitação.....</i>	<i>30</i>
<b>2.4.3</b>	<b>Comparação dos Processos de Remoção de Fósforo. ....</b>	<b>32</b>
2.5	ALTERNATIVAS PARA REÚSO DO FÓSFORO .....	33
<b>2.5.1</b>	<b>Reúso da Fração Líquida do Fósforo.....</b>	<b>35</b>
<b>2.5.2</b>	<b>Reúso da Fração Sólida do Fósforo.....</b>	<b>36</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>37</b>
3.1	Metodologia utilizada para levantamento de dados.....	37
3.2	Local De Estudo .....	40
3.3	Balanço De Massa .....	42
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>43</b>
4.1	Levantamento de dados sobre fósforo no esgoto sanitário de Florianópolis.....	43
4.2	Tecnologias e eficiências de remoção de fosforo das ETE de Florianopolis .....	46

4.3	Destinação final do fósforo removido dos esgoto sanitário pelas ETE de florianopolis.....	49
4.4	Potencialidades de reúso do fosforo no contexto de recuperação de recursos .....	54
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>57</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>58</b>
	<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>65</b>
	<b>APÊNDICE B.....</b>	<b>66</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O fósforo é um elemento essencial e não renovável para a produção de alimentos, cuja principal matriz primária é a rocha fosfática. A produção de 1 kg de fósforo demanda aproximadamente 7 kg dessa rocha, e essa relação tem se tornado menos favorável ao longo do tempo, à medida que os teores de fósforo nas rochas diminuem, implicando em volumes crescentes de extração para obter a mesma quantidade do elemento. Essa exploração de rochas fosfáticas, seja de origem geológica sedimentar ou ígnea, é predominantemente sedimentar, abarcando cerca de 95% da oferta global (SASABUCHI et al., 2022).

O fósforo, presente tanto nos efluentes como nas águas naturais, aparece na forma de fosfato, podendo ser encontrado nas formas orgânica e inorgânica. A proporção das diferentes frações de fósforo nos efluentes sanitários é variável, e também influenciada pelas condições socioeconômicas e culturais das populações em diferentes localidades (QUEVEDO, PIVELI E PAGANINI, 2017). A presença de altas concentrações de fósforo nos efluentes tratados pode causar impactos ambientais negativos, como a eutrofização de corpos d'água. Originado principalmente de atividades agrícolas e descarte de resíduos urbanos MOCELIN (2021), o excesso de fósforo resulta na proliferação de algas tóxicas, levando à diminuição do oxigênio na água e à formação de zonas mortas (EPA, 2023). Além dos impactos locais, a eutrofização se torna uma preocupação global, desestabilizando o ciclo natural do fósforo e restringindo os usos múltiplos da água (SILVA, 2019).

Existem diversas técnicas para remover o fósforo das águas residuais, as mais comuns são as biológicas, e químicas. Esses processos ocorrem nas Estações de Tratamento de Efluentes (ETE), e são potenciais fontes emissoras de fósforo, sendo responsáveis por 30 a 50% da poluição total em decorrência desse elemento (SOROKA et al, 2021). No município de Florianópolis, ainda são verificadas limitações quanto às tecnologias para remoção de fósforo nos processos de tratamento das ETE, que pode acarretar o excesso de fósforo nos efluentes tratados, o que pode comprometer a qualidade ambiental dos corpos hídricos locais.

A discussão sobre as elevadas cargas de nutrientes lançados nos corpos hídricos na cidade de Florianópolis foi intensificada após o rompimento da barragem de uma lagoa de Evapoinfiltração (LEI). Essa lagoa está sob responsabilidade da companhia de saneamento do município e armazena efluente tratado, quando rompeu-se em janeiro de 2021, despejou no ecossistema da Lagoa da Conceição toneladas de sedimentos (areia) e de matéria orgânica. O

relatório emitido pelo Projeto Ecoando Sustentabilidade, apresenta a estimativa de carga de 0,65 toneladas de fósforo total lançados na laguna por esse evento.

A remoção do Fósforo, pode ocorrer por processos biológicos, mas algumas vezes exige tratamentos físico-químicos. Esta estratégia demanda esforços e custos operacionais, e pode não ser suficiente para atender às exigências da legislação e não interferir negativamente no corpo receptor. Desta maneira, as perspectivas vão além de retirar o fósforo das águas residuais, mas também analisar as possibilidades de recuperá-lo para outras finalidades. Como alternativa emergente surge o reúso do efluente tratado em irrigação, utilizando-o como fonte de nutrientes, além do suprimento de água às plantas. Essa alternativa pode simplificar substancialmente os processos de tratamento, pois dispensa a necessidade de remoção de nitrogênio e fósforo. Essa prática pode contribuir para diminuir os problemas da contaminação dos corpos hídricos (CHRISPIM; SCHOLZ; NOLASCO, 2019).

O presente trabalho teve como objetivo a realização de um levantamento da situação atual e perspectivas futuras da remoção e reutilização do fósforo nos efluentes tratados das ETE de Florianópolis. Para isso, foram quantificadas as cargas de fósforo que chegam nas ETE, realizando um diagnóstico com base na vazão e composição média do esgoto sanitário. Ainda, foi realizado um levantamento das tecnologias de tratamento das ETE, com foco na remoção do fósforo. A partir destas informações, foram propostas alternativas para a remoção do fósforo e sua reutilização, visando contribuir para a circularidade deste nutriente, destacando o potencial de transformar as ETE em unidades de recuperação de recursos e a redução do impacto ambiental associado à essa prática.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Realizar um diagnóstico da situação atual e das perspectivas futuras quanto a remoção e reutilização de Fósforo no esgoto sanitário tratado pelas Estações de Tratamento de Efluentes (ETE) de Florianópolis.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

Estimar as cargas de fósforo que chegam às ETE de Florianópolis;

Investigar a remoção do fósforo do esgoto sanitário pelas ETE e sua destinação final, considerando as frações líquidas e sólidas;

Propor alternativas para remoção e reutilização do fósforo presente no efluente tratado e no lodo residual.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 FÓSFORO NA NATUREZA

O fósforo é um elemento essencial para todos os seres vivos, está presente na constituição dos componentes vitais da célula, segundo Sasabuch et al. (2022), tais como as membranas celulares fosfolipídicas, a molécula de transferência de energia intracelular ATP e na formação de ligações de fosfodiéster entre os nucleotídeos presentes no DNA e RNA. Esses processos biológicos fundamentais estão intrinsecamente ligados ao fósforo e são cruciais para o funcionamento adequado das estruturas celulares e dos processos metabólicos.

Além disso, o fósforo faz parte dos ciclos biogeoquímicos e está presente em solos, rochas e corpos d'água. O ciclo do fósforo envolve a transferência entre compartimentos terrestres e aquáticos, influenciando a disponibilidade desse nutriente para os ecossistemas (SILVA, 2019). O fósforo total pode estar presente em águas naturais e em águas residuárias quase exclusivamente na forma de fosfato ( $PO_4^{-3}$ ). Os fosfatos são classificados sob duas formas: fosfatos ligados a compostos orgânicos e fosfatos inorgânicos, os ortofosfatos e fosfatos condensados (piro-, meta-, e outros polifosfatos) (MARIN, 2021, p. 31).

Segundo Teofilo (2019), a parcela inorgânica se refere a detergentes e produtos químicos, e a orgânica tem origem fisiológica. Essas formas podem estar relacionadas à dissociação de componentes do solo ou à decomposição de matéria orgânica.

Sua disponibilidade para os organismos é influenciada por processos de erosão, lixiviação e interações químicas nos solos (WITEK-KROWIAK et al., 2022). Em algumas regiões, segundo Marin (2021), a disponibilidade de fósforo limita a produção agrícola, exigindo adições regulares desse nutriente para a produção de alimentos e materiais fibrosos. Desta forma, o fósforo inorgânico é acrescentado ao solo como fertilizante.

Em ambientes aquáticos, altas concentrações de fósforo podem levar a fenômenos de eutrofização, que é o crescimento excessivo de algas e plantas estimulados pela sobrecarga de nutrientes disponíveis perturbando a saúde dos ecossistemas aquáticos (SHARPLEY et al., 2019). Esse fenômeno é desencadeado pelo excesso de nutrientes, notadamente o fósforo. Segundo Mocelin (2021), a entrada desse nutriente provém de atividades agrícolas e despejo de resíduos urbanos. O acúmulo de fósforo favorece a proliferação de algas tóxicas nos mananciais (GUIMARÃES, p. 35, 2017), resultando em florações algais que, por sua vez,

levam à redução dos níveis de oxigênio da água, causando a morte de organismos aquáticos e a formação de zonas mortas (EPA, 2023).

O fósforo ingressa nos corpos d'água e apresenta propensão a se depositar nos sedimentos, os quais atuam como reservatório, acumulando contribuições históricas de fósforo. Segundo Silva (2019), esses sedimentos são periodicamente remobilizados para a coluna d'água por meio de diversos processos naturais ou influências antropogênicas. Tal remobilização pode resultar na liberação subsequente de fósforo para a coluna d'água.

Além dos impactos locais, a eutrofização emerge como uma problemática ambiental de relevância global. A entrada desproporcional de nutrientes, desestabiliza o ciclo natural do fósforo. Isso pode comprometer a qualidade da água e restringir os usos múltiplos dos corpos hídricos (SILVA, 2019). A recuperação de ecossistemas degradados por eutrofização revela-se um desafio, pois, conforme Guimarães (2017), o controle e remediação de áreas impactadas ainda são bastante complexos, dada a persistência dos efeitos nocivos nos ambientes aquáticos.

## 2.2 FÓSFORO NO EFLUENTE DOMÉSTICO

O efluente doméstico é uma fonte significativa de fósforo nos corpos d'água, devido à presença de detergentes, produtos de higiene pessoal e resíduos orgânicos, além da urina e das fezes que contêm esse elemento. O fósforo nos efluentes pode estar nas formas inorgânica e orgânica, e a proporção entre elas varia de acordo com hábitos culturais e econômicos das populações (METCALF & EDDY, 2016).

O fósforo total presente nos efluentes domésticos é identificado na forma de fosfato. A forma predominante de ortofosfatos é o  $HPO_4^{-2}$  (fosfato de hidrogênio). Já o fósforo particulado, incluindo o  $PO_4$  (fosfato) adsorvido às partículas de solo e incorporado à matéria orgânica, constitui uma fonte de caráter de longo prazo no ambiente por não ser facilmente dissolvido (PASQUALINI, 2020).

O Quadro 1 apresenta as principais características químicas referentes ao fósforo nos efluentes domésticos.

Quadro 1- Característica químicas do Fósforo.

<b>Parâmetro</b>	<b>Descrição</b>	
Fósforo Total	O fósforo total existe na forma orgânica e inorgânica. É um nutriente indispensável no tratamento biológico.	
Fósforo Orgânico	Combinado à matéria orgânica.	Fósforo Particulado
Fósforo Inorgânico	Ortofosfato e polifosfatos	Fósforo Solúvel

Fonte: Adaptado de Marin, 2021.

No contexto do saneamento básico, a literatura especializada no Brasil descreve uma ampla faixa típica de concentração de fósforo total em efluentes, variando de 5,0 a 20,0 mg.P/L, e esta variação é frequentemente distribuída nas frações de fósforo com uma média de 40% de fósforo orgânico e 60% de fósforo inorgânico, de acordo com diversos autores, incluindo Von Sperling et al. (2009), Randall et al. (2010) e Jordão e Pessôa (2011) conforme destacado por Quevedo, Piveli e Paganini (2017).

As águas residuais constituem uma fonte complexa e variada de diferentes macroelementos, microelementos, matéria orgânica e metais pesados. No contexto das águas residuais, o fósforo é geralmente presente em baixas concentrações, porém, devido ao volume significativo de águas residuais produzido pela população, essa baixa concentração resulta em quantidades consideráveis desse elemento. Para ilustrar, Witek-Krowiak (2022) aponta que um cidadão da União Europeia (UE) produz aproximadamente 200 litros de águas residuais por dia, contendo, em média, uma concentração de 10 mgP/L, e carga estimada entre 1,8 e 2,5 gramas de fósforo por dia. No Brasil, a geração média per capita de águas residuais é de 140 litros por dia (SNIS, 2021), com concentração na ordem de 4 a 50 mg/L, e contribuição diária per capita de carga de fósforo de 0,7 a 2,5 g (POLIGNANO, 2014). Isso implica em uma potencial fonte de fósforo nas águas residuais geradas por um indivíduo, com aproximadamente 1 quilo de fósforo por ano.

### 2.3 LANÇAMENTO DE EFLUENTES EM CORPOS D'ÁGUA

A origem do fósforo encontrado nas águas residuais provém de múltiplas fontes, destacando-se as atividades agrícolas que fazem uso de fertilizantes, o escoamento urbano de águas pluviais resultantes de chuvas e o aporte de efluente doméstico e efluentes industriais, provenientes de setores como a pecuária e a avicultura. Adicionalmente, outras fontes de

contribuição incluem resíduos alimentares, detergentes e material celular de microrganismos (CABRAL, 2019).

O lançamento de efluente em corpos d'água constitui uma das principais fontes de nutrientes, com especial ênfase na drenagem pluvial urbana e no despejo de efluentes, conforme salientado no estudo Mota e Von Sperling (2009). Quando a quantidade de efluentes descarregada excede a capacidade de assimilação do corpo receptor, emerge a contaminação ambiental, resultando em consequências prejudiciais para a saúde pública. O excesso de fósforo desencadeia o fenômeno da eutrofização, caracterizado pelo enriquecimento excessivo da água com nutrientes, estimulando o crescimento exacerbado de algas e plantas (MARIN, 2021). Em ecossistemas aquáticos, é frequente a diminuição da concentração de oxigênio dissolvido, podendo, em situações extremas, levar à morte de diversos organismos presentes no ambiente aquático contaminado (TEOFILO, 2019).

As ETE são potenciais fontes emissoras de fósforo, e são responsáveis por 30 a 50% da poluição total em decorrência desse elemento (SOROKA et. al., 2021). Por isso se torna essencial que a remoção de nutrientes como o fósforo dos efluentes seja eficiente, a fim de evitar sua introdução em quantidades substanciais nos corpos hídricos receptores. Como mencionado por Teofilo (2019), a presença significativa de fósforo em meios líquidos pode induzir ao processo de eutrofização, ocasionando alterações nas propriedades da água, redução da profundidade líquida e acúmulo de sedimentos nos leitos fluviais.

Florianópolis segue as regulações estabelecidas pela Resolução CONSEMA N° 181 DE 02/08/2021. De acordo com o Art. 4° - V, que trata sobre as definições adotadas nesta Resolução, os lançamentos em trechos de lagoas, lagunas e estuários, deve ser observado o limite de 4 mg/L de concentração de fósforo total, sendo que o efluente deve atender aos valores de concentração acima estabelecidos ou os sistemas de tratamento que devem operar com a eficiência mínima de 75% (setenta e cinco por cento) na remoção de fósforo, desde que não altere as características dos corpos de água previstas em lei. A disposição de efluentes em solo também segue a regulamentação desta resolução, quanto aos padrões de lançamento, descrita no Art. 9°.

Segundo Mota e Von Sperling (2009), a resolução n° 357, de 17 de março de 2005, do CONAMA, dispõe sobre a classificação dos corpos d'água superficiais e sobre diretrizes ambientais para o seu enquadramento e estabelece as condições e padrões para lançamento de efluentes em corpos d'água. Desta forma, esta resolução define os padrões de qualidade para

diversas formas de fósforo, e os teores permitidos para as suas concentrações, são associados às várias classes dos corpos d'água.

A Resolução CONAMA N° 359/05, estabelece porcentagens máximas de fósforo na composição de detergentes em pó utilizados nacionalmente. O valor percentual corresponde a 4,8%, determinado como o limite máximo de fósforo na formulação deste produto. O objetivo é reduzir o aporte em corpos hídricos, do elemento oriundo desta fonte (Sasabuchi et al, 2022, p.187).

As resoluções CONAMA N° 357/2005 e N° 430/2011, definem os parâmetros de qualidade para efluentes lançados em corpos d'água. O limite máximo é 0,03 mg/L de fósforo reativo para ambientes lênticos e 0,05 mg/L para ambientes intermediários. A resolução CONAMA 430/2011, que estabelece que os limites e critérios para o descarte de resíduos contendo fósforo devem ser determinados pelo órgão ambiental competente, sem a imposição de um valor máximo permitido

#### 2.4 PRINCÍPIOS E PROCESSOS PARA REMOÇÃO DE FÓSFORO EM ETE.

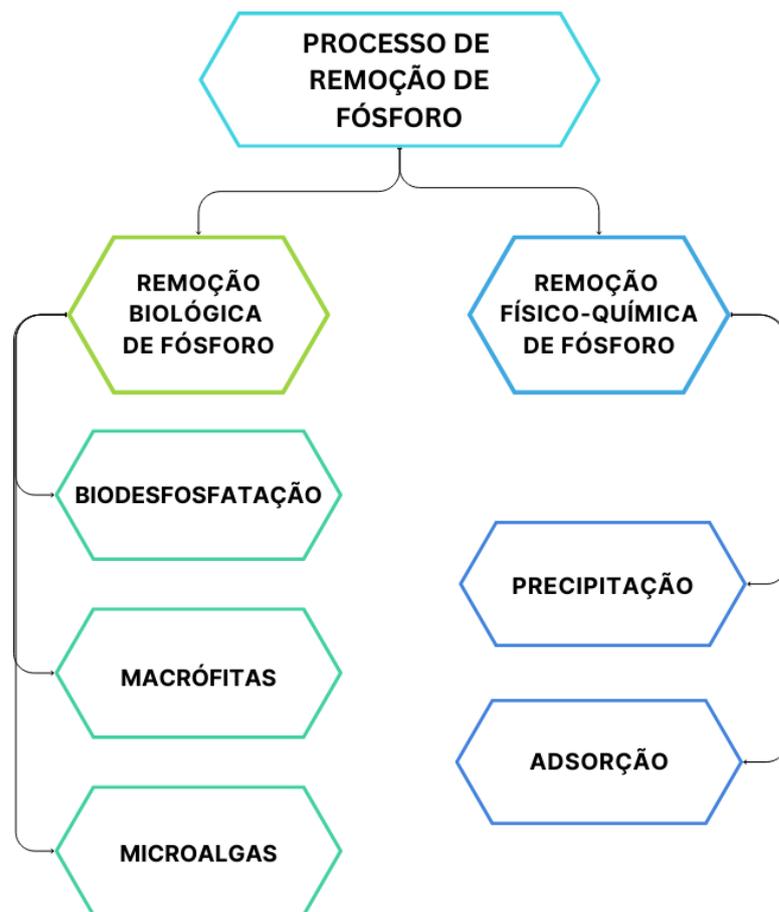
Os impactos negativos sofridos pelos corpos hídricos, devido sobretudo pela eutrofização, são consequência do lançamento de efluentes. Por isso, a remoção do Fósforo em ETE é de suma importância (GARSS, 2019). Duas classes são elencadas para remoção de Fósforo nas ETE, são elas: a remoção biológica e a química.

As tecnologias para remoção de fósforo foram inicialmente compreendidas por métodos físico-químicos, principalmente a precipitação com metais, formando fosfatos poucos solúveis como fosfato de cálcio  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ , apatita  $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3$  ou estruvita  $\text{NH}_4\text{MgPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (MOTA; VON SPERLING, 2009, p.228). Entretanto, a remoção química de fósforo tem como característica o custo permanente com produtos químicos e grande quantidade de lodo químico residual. Além disso, a adição de sais nos processos de tratamento gera acumulação de íons na água, podendo limitar sua reutilização em diversos usos. Apesar disso, a remoção química de fósforo vem sendo amplamente utilizada pela facilidade de sua adaptação em ETE já existentes e que não estejam atingindo os limites legais para remoção deste nutriente. Em contraponto, a remoção biológica de fósforo exige a compreensão dos processos microbiológicos para que os projetistas e operadores tenham êxito na remoção deste nutriente.

A técnica de precipitação química com sais de ferro ou alumínio pode ser aplicada em uma variedade de sistemas de tratamento de esgoto, dependendo das necessidades específicas de remoção de fósforo e das características do efluente a ser tratado (METCALF e EDDY, 2016). Já a Adsorção em Materiais Filtrantes é uma técnica usada como etapa de polimento para remover o fósforo residual após o tratamento biológico.

Os processos biológicos de remoção de fósforo podem ser integrados a sistemas de lodos ativados para remover fósforo de efluentes. Essa é uma abordagem frequentemente utilizada como uma etapa de pós-tratamento para remover o fósforo residual após o tratamento biológico. Segundo Metcalf e Eddy (2016), trata-se de uma combinação eficaz para alcançar altas eficiências de remoção de fósforo.

Figura 1 - Representação esquemática do processo de remoção de fósforo.



Fonte: Adaptado de Garss, 2019.

### 2.4.1 Princípios da Remoção Biológica de Fósforo – Biodesfosfatação

A remoção biológica de fósforo, ou biodesfosfatação, é um processo que se baseia na habilidade de microrganismos, como bactérias, algas e vegetais, acumularem polifosfatos a partir do fosfato disponível nas águas residuais. As pesquisas acerca da remoção biológica de fósforo teve início na década de 1970, conforme documentado por Mota e Von Sperling (2009), quando pesquisadores como Fuhs e Chen (1975), Barnard (1975) e Nicholls (1975) elucidaram a natureza biológica dos processos de remoção de fósforo nos sistemas de lodos ativados. Os processos biológicos, segundo Arenhart (2019), são configurados para incentivar o crescimento de bactérias com a capacidade de absorver e armazenar grandes quantidades de fósforo inorgânico. Este método utiliza microrganismos capazes de acumular ou precipitar o fósforo, que é assimilado pela biomassa celular, e posteriormente é removida dos processos, como lodo residual.

O processo de biodesfosfatação envolve a seleção e o estímulo de microrganismos específicos, como bactérias acumuladoras de polifosfato (OAP), internacionalmente conhecidas como Polyphosphate Accumulating Organisms (PAO), que têm a capacidade de armazenar o fósforo na forma de polifosfatos.

A eficiência do processo é influenciada por fatores ambientais, como temperatura, pH e oxigênio dissolvido. O lodo resultante pode ter concentrações significativas de fósforo, proporcionando oportunidades para a recuperação eficiente desse nutriente valioso (Ó, 2021). Segundo Ogunlaja e Parker (2015), a alternância de períodos aeróbios e anaeróbios no sistema, por meio do sequenciamento de aerações, é uma estratégia para promover a biodesfosfatação em sistemas de tratamento de águas residuais, pois promovem condições que favoreçam o acúmulo de fósforo pelos microrganismos.

Em condições anaeróbias, as bactérias armazenam os ácidos graxos voláteis, sob forma de quatro polihidroxicanoatos (PHA's): polihidroxiacetato (constituído de acetato); polihidroxi-valerato e polihidroxi-2-metilbutirato (constituídos de acetato e propionato); e o polihidroxi-2-metilvalerato (constituído de propionato) (GARSS, 2019, p.14). Para a síntese dos PHA's é utilizada a energia da molécula de trifosfato de adenosina (ATP). Além disso, sob essas condições, as bactérias específicas, segundo Mota e Von Sperling (2009), *Acinetobacter*, necessitam de energia para assimilar a matéria orgânica, com a quebra das cadeias de reserva energética ATP-ADP. Esse processo libera o fosfato da massa bacteriana para a fase líquida, e aumenta a concentração de fósforo no líquido, maior do que aquela

encontrada no afluente. A zona anaeróbia é fundamental no primeiro momento, para que o afluente, rico em material que se biodegrada rapidamente, seja descarregado.

Na zona aeróbia subsequente, há uma incorporação de fosfato pelo lodo (MOTA; VON SPERLING, 2009), pois o fósforo é novamente absorvido por essas bactérias, que em condições anaeróbias armazenaram os PHA's, capturam o polifosfato (Pi) do meio e, com o consumo de ATP (GARSS, 2019, p.15). Essa nova absorção de fósforo acontece em maiores quantidades do que as necessárias para o metabolismo bacteriano, segundo Garss (2019) as bactérias utilizam esta energia para o seu crescimento. Essa absorção de fósforo em excesso é um processo conhecido como "luxury uptake" (LEAL, 2017).

O termo "luxury uptake" se refere ao consumo excessivo de fósforo pelos microrganismos que foram submetidos ao estresse na fase anaeróbia. Esse mecanismo ocorre porque os microrganismos acumulam fósforo em excesso durante a fase anaeróbia, o que lhes permite crescer e se reproduzir mais rapidamente na fase aeróbia, mesmo que haja um excesso de fósforo disponível. Esse excesso de fósforo é armazenado como polifosfato intracelular, que é posteriormente removido do sistema através da remoção do lodo biológico, onde se elimina uma fração do licor misto contendo todos os organismos presentes no lodo ativado (LEAL, 2017).

Por fim, o excesso de lodo, ao ser descartado, carrega consigo a massa de fósforo absorvida, removendo-a do sistema. A maior fração de massa de fósforo no lodo ativo, naturalmente, resultará em uma maior remoção de fósforo através da descarga de lodo de excesso. Verifica-se então, uma elevada remoção global nesse sistema, quando comparados aos sistemas sem a zona anaeróbia (MOTA; VON SPERLING, 2009).

A concentração que se procura obter no final é menor do que 1 mgP/L, mas isto só é factível quando as condições são favoráveis (baixa razão P/DQO, curta idade de lodo). A relação P/DQO é um indicador que reflete a proporção de fósforo em relação à matéria orgânica biodegradável presente nos efluentes (Ó, 2021). A presença de uma quantidade elevada de matéria orgânica pode competir pela atenção das bactérias, limitando a sua capacidade de absorver e remover o fósforo, resultando em uma menor relação P/DQO, que por sua vez minimiza a formação excessiva de biomassa com alta carga de fósforo. Uma idade de lodo mais curta promove um ambiente no qual as bactérias são mais eficientes na assimilação de matéria orgânica e fósforo, esses dois fatores contribuem para um efluente final com concentrações mais baixas de fósforo (MOTA; VON SPERLING, 2009).

O desenvolvimento dos estudos de Mota e Von Sperling (2009) apontam que, atualmente, há o consenso de que a remoção em excesso ocorre devido ao desenvolvimento de uma massa bacteriana com teor de fósforo muito superior ao presente no lodo de sistemas convencionais. As análises de Leal (2017) destacam a eficácia potencial dos reatores de bateladas sequenciais como uma alternativa promissora para a remoção de fósforo em tratamentos de águas residuais, além de sublinhar a relevância crítica das zonas anaeróbias e aeróbias no contexto da remoção biológica de fósforo.

Outro mecanismo conhecido para remoção biológica de fósforo assistida, do inglês Enhanced Biological Phosphorus Removal – EBPR, trata da sua incorporação no lodo, efetuada por bactérias heterotróficas, que armazenam fosfato em PHA durante a fase anaeróbia e incorporam esse fosfato no lodo, removendo-o do sistema na fase aeróbia subsequente, que será posteriormente descartado juntamente com o lodo excedente (LEAL, 2017). Ambos os métodos são estratégias eficientes de remoção biológica de fósforo em sistemas de tratamento de águas residuais.

#### *2.4.1.1 Remoção de Fósforo por Macrófitas*

As macrófitas são plantas aquáticas que variam entre espécies emergentes, com folhas flutuantes, submersas enraizadas, submersas livres ou aquáticas flutuantes segundo Iervolino (2019), e podem contribuir significativamente para a remoção de fósforo em sistemas aquáticos. A vegetação desempenha uma função complementar no tratamento de esgotos, proporcionando condições ideais para o desenvolvimento de microorganismos que participam ativamente no tratamento biológico de águas residuárias. Mocelin (2021), aponta que essa contribuição é possível graças à transferência de oxigênio para o leito de tratamento, realizada pelas plantas por meio de suas raízes e rizomas que atuam como filtros naturais.

A remoção eficaz de fósforo de efluentes por macrófitas aquáticas flutuantes, tem sido uma área de pesquisa destacada, como apontado por Mohedano (2004). A principal via de remoção de fósforo, é pela absorção direta pela planta, através da ação de microorganismos fixados nas raízes e incorporação na biomassa vegetal e microbiana. Estudos anteriores indicam uma considerável eficiência nesse processo, como evidenciado por experimentos com *Lemna giba*, que mostraram uma redução de 63% a 99% de fósforo total em esgoto doméstico. Resultados mais recentes de Mohedano et al. (2012) complementam essa perspectiva ao considerar macrófitas flutuantes no tratamento de efluentes de peixes e suínos.

Os tanques contendo essas espécies atingiram uma taxa de remoção de cerca de 94,5%, mostrando a capacidade efetiva desse processo em remover compostos de fósforo dos efluentes, principalmente por meio da absorção de biomassa.

A utilização de leitos de macrófitas é uma reprodução dos mecanismos de degradação de poluentes que ocorrem espontaneamente nas zonas húmidas naturais (MOCELIN, 2021). Conhecidos como wetlands, trata-se de uma tecnologia de tratamento de sistema biológico, nos quais a microbiota, que se desenvolve naturalmente no leito, é a principal responsável pela degradação da matéria orgânica presente nos efluentes. A presença das macrófitas serve para criar uma superfície para o crescimento de microrganismos e adesão do biofilme, atuando na retirada de nutrientes do efluente (IERVOLINO, 2019).

O principal objetivo da utilização de sistemas de wetlands construídas, é a melhoria da qualidade da água, seguido por objetivos secundários, tais como: produção fotossintética, produção de energia, podendo também ser utilizados recreacionalmente, comercialmente e para educação humana (MOCELIN, 2021). Embora essas abordagens demonstrem eficiência notável na remoção de nutrientes, é essencial implementar um gerenciamento cuidadoso e monitoramento constante, particularmente na remoção da biomassa, para evitar a reintrodução de nutrientes na coluna d'água.

#### *2.4.1.2 Remoção de Fósforo por Microalgas*

As microalgas são organismos unicelulares que possuem a capacidade de capturar fósforo através do processo de incorporação celular durante o crescimento (GARSS, 2019). Elas podem ser cultivadas em sistemas de lagoas ou fotobiorreatores, utilizando a energia solar para realizar a fotossíntese, segundo Santos (2022).

Durante esse processo, as microalgas retiram nutrientes, incluindo fósforo, da água, contribuindo para a sua remoção. A biomassa de microalgas resultante pode ser posteriormente recuperada e utilizada para produção de bioenergia, rações animais ou até mesmo como matéria-prima para outros produtos (VAZ, 2023).

Outra tecnologia para produção de Microalgas é uma abordagem inovadora, que utiliza fotobiorreatores híbridos para recuperar fósforo da fase sólida do efluente de ETE. Segundo Chrispim, Scholz e Nolasco (2019), o processo envolve as etapas da mistura do esgoto com microalgas em tanques de homogeneização, e a separação da biomassa de

microalgas por decantação ou filtração. Com isso, os subprodutos gerados são biomassa e lipídios, que podem ser usados para produzir biocombustíveis. A biomassa também pode ser usada como matéria-prima para ração animal ou como fertilizante. Apesar de ainda estar em fase experimental, e envolver diversos processos como desinfecção solar e coluna de adsorção, que destacam a complexidade e a inovação dessa estratégia, essa tecnologia mostra um potencial considerável para ser uma opção eficiente e sustentável na remoção de fósforo em sistemas de tratamento de águas residuais.

## **2.4.2 Remoção de Fósforo por processos Físico-Químicos**

A remoção físico-química do fósforo em estações de tratamento envolve a utilização de processos que exploram as propriedades físicas e químicas dos compostos fosfatados para separá-los do efluente tratado. Os principais métodos físico-químicos usados para remover o fósforo incluem a adsorção e a precipitação química.

O processo de remoção do fósforo por adsorção baseia-se no acúmulo de fósforo na superfície do sólido, ligado por forças de Van Der Waals ou por ligação iônica. Já a precipitação química baseia-se na reação de um metal com o fosfato formando um sal insolúvel no meio (GARSS, 2019).

### *2.4.2.1 Remoção de Fósforo por Adsorção*

A remoção de fósforo por adsorção é um processo físico-químicos pelo qual compostos fosfatados são removidos do efluente, ligando-se a superfícies de materiais adsorventes. Esse método químico tem a finalidade de complementar o processo de redução das concentrações de fósforo nos efluentes (ARENHART, 2019 ).

A técnica de adsorção tem como princípio a transferência de massa onde, os íons fosfato (adsorvato) presentes no efluente aderem à superfície dos adsorventes devido a interações eletrostáticas e químicas. Esse processo, segundo Sasabuchi et al (2022), possibilita a separação do fósforo do meio aquoso, e pode ser classificado de acordo com a natureza das forças envolvidas na interação adsorvato e adsorvente. O fósforo orgânico e os polifosfatos são removidos por adsorção aos flocos particulados ou reações mais complexas (MOTA; VON SPERLING, 2009, p.347).

O método de adsorção é recomendado para a remoção de baixas concentrações de Fósforo de águas residuais, e a mais adequada para recuperar o nutriente adsorvido para utilização subsequente. Sasabuchi et al (2022), discorre sobre os materiais estudados e explorados em diferentes abordagens de adsorção para remover fósforo, dentre eles, óxido de alumínio e ferro, argilas modificadas com metais como lantânio e ferro, biochar (biomassa de origem vegetal) obtido a partir de folhas de alecrim (*Rosmarinus officinalis*), e membranas poliméricas incorporadas com nanopartículas inorgânicas.

Arenhart (2019), apresenta em seu estudo que a reciclagem e reutilização de resíduos industriais e agrícolas como adsorventes para remoção de fósforo está crescendo, visto que é uma alternativa ecologicamente correta e econômica para remoção de fosfato de efluentes. Segundo o autor, diversos materiais podem ser utilizados como adsorventes, dentre eles: Cinzas volantes de carvão, escória, lama vermelha, lodo de alumínio, ossos bovinos, turfa, concha de ostra, concha de vieira, palha de trigo e rejeitos de óxido de ferro.

Dall'agnol, Libardi, Silva e Costa (2021) realizaram um estudo que empregou esferas de exopolímero tipo alginato (ALE), obtidas do lodo granular aeróbio residual, em experimentos de adsorção de fósforo em solução aquosa. A análise abordou as interações de forças eletrostáticas, ligações de hidrogênio e interações de Van der Waals entre o fósforo e os grupos funcionais na superfície das esferas. A modelagem de Langmuir foi aplicada, revelando a formação de uma monocamada na superfície das esferas. A cinética de adsorção seguiu o modelo de pseudo-primeira ordem, indicando uma relação proporcional entre a concentração de fósforo adsorvido e o tempo. A análise termodinâmica apontou que o processo é endotérmico e não espontâneo, porém sua viabilidade é potencializada com o aumento da temperatura, proporcionando a compreensão dos mecanismos envolvidos na adsorção de fósforo em sistemas aquosos.

Dall'agnol et. al. (2020), apresentaram uma pesquisa que investigou o uso de esferas de alginato e biopolímeros extraídos de lodo granular como material adsorvente na remoção de fósforo. A metodologia da pesquisa consistiu em experimentos em laboratório, nos quais foram avaliados os efeitos de variáveis, como pH, tempo de contato e concentração inicial de fósforo, na eficiência de remoção do nutriente pelos materiais adsorventes. Os resultados mostraram que as esferas de alginato e biopolímeros extraídos de lodo granular apresentaram alta capacidade de adsorção de fósforo, sendo capazes de remover mais de 90% do nutriente do meio aquático em algumas condições experimentais.

A eficácia da remoção por adsorção depende de vários fatores, como a escolha do adsorvente, tamanho das partículas, tempo de contato entre a água e o adsorvente, concentração inicial de fosfato e pH da solução. Além disso, a regeneração dos adsorventes é uma etapa importante, uma vez que, ao longo do tempo, os sítios de adsorção podem se saturar e precisar ser reativados ou substituídos.

No contexto de materiais adsorventes, os recursos naturais de custo acessível e ampla disponibilidade estão ganhando proeminência (ARENHART, 2019). No entanto, a utilização de certos desses materiais é limitada por desvantagens como custos elevados, superprodução de lodo e potenciais contaminações por metais pesados. A área de adsorção está em constante evolução, com perspectivas promissoras no horizonte, incluindo a reutilização do fósforo adsorvido como fertilizante (SASABUCHI et al, 2022).

#### *2.4.2.2 Remoção de Fósforo por Precipitação*

O fósforo pode ser removido das águas residuárias pela conversão dos íons, inicialmente em uma solução aquosa, em uma fração sólida. O processo de formação deste composto insolúvel é conhecido como precipitação e ocorre quando os íons de duas ou mais substâncias se combinam para formar partículas sólidas que se separam da solução devido à sua insolubilidade. Contudo, essa fração pode ser um precipitado de sal insolúvel, uma massa microbiana em um lodo ativado ou uma biomassa vegetal em áreas úmidas construídas (ARENHART, 2019, p.21).

Os produtos químicos mais utilizados para precipitar o fósforo presente no efluente sanitário são cal, sais metálicos de alumínio ou cloreto férrico. Esses produtos, segundo Mota e Von Sperling (2009), são adicionados à fase líquida e reagem com o ortofosfato solúvel, até produzirem precipitados de sais insolúveis de fosfato, que são combinados aos sólidos em suspensão e a matéria orgânica para serem removidos do sistema na forma de lodo primário, secundário e/ou terciário.

A precipitação química é capaz de remover mais de 90% do Fósforo presente nos efluentes, e segundo Sasabuchi et al. (2022), trata-se de uma técnica simples, eficiente e de fácil operação. A precipitação química permite a obtenção de efluentes com concentração de fósforo de até 0,1 mg/L. (MOTA; VON SPERLING, 2009, p.347).

Esse método remove além dos nutrientes/Fósforo, vários outros resíduos, alguns dos quais são tóxicos. Os resíduos dos fosfatos não solubilizados, em grande maioria, após a

incineração de matéria orgânica, são enterrados em aterros sanitários. Além disso, Arenhart (2019), aponta que esses resíduos também podem ser utilizados como fertilizante de lodo, entretanto, necessitam de um tratamento para eliminar patógenos humanos e compostos tóxicos presentes.

Dependendo da composição do resíduo é possível utilizá-lo diretamente como fertilizante. A estruvita, produto da reação entre íons de magnésio, amônio e fosfato, é um exemplo desse tipo de composto (SASABUCHI et al., 2022, p.190).

A estruvita, um composto resultante da precipitação química de fosfato e magnésio em efluentes tratados, representa uma alternativa para a recuperação de fósforo. O método de precipitação da estruvita envolve a adição de uma fonte externa de magnésio, como cloreto de magnésio ou sal marinho, em uma solução que contém fosfato de amônio e amônia, como a urina humana (SANTOS, 2019). Essa reação promove a formação de cristais de estruvita, que são separados da solução e se acumulam no fundo do recipiente. A vantagem desse processo é a obtenção de nutrientes prontamente disponíveis para as plantas, com concentrações mais adequadas e menores índices de metais pesados em comparação com fertilizantes químicos convencionais. Chrispim, Scholz e Nolasco (2019) destacam que o processo de formação da estruvita ocorre em condições específicas de pH, quando há um excesso de fosfato, amônio e magnésio no efluente tratado. A principal aplicação da estruvita reside na agricultura, onde ela atua como um fertilizante de liberação lenta. O fósforo desempenha papel fundamental nos processos celulares, como a formação de DNA, RNA e ATP, além de participar ativamente na fotossíntese e no metabolismo energético (SANTOS, 2019). Assim, a incorporação da estruvita como fertilizante não apenas contribui para a produtividade agrícola, mas também reduz a dependência de fertilizantes sintéticos, promovendo a sustentabilidade e conservação de recursos naturais.

No âmbito do saneamento ecológico, a possibilidade de recuperar fósforo por meio da reciclagem de urina humana se destaca como uma alternativa técnica e sustentável. O estudo conduzido por Barton et al. (2021), apresenta um conjunto de dados que exploram as atitudes dos consumidores de alimentos nas universidades em relação a essa prática inovadora, que envolve a separação da urina do restante dos resíduos e a utiliza como fertilizante para o cultivo de alimentos. A pesquisa, envolvendo 3.763 membros da comunidade universitária de 20 instituições em 16 países, apresentou resultados que mostraram que há uma disposição geral entre os consumidores para reciclar a urina humana

como fertilizante para culturas. No entanto, a disposição de pagar um preço por esses alimentos varia. Com essas informações é possível compreender as perspectivas de implementação de sistemas de reciclagem, e incentivar o desenvolvimento de futuras pesquisas nessa área.

### 2.4.3 Comparação dos Processos de Remoção de Fósforo.

As pesquisas desenvolvidas têm contribuído significativamente para o avanço do conhecimento acerca da viabilidade e otimização do processo de remoção biológica de fósforo. Os métodos biológicos são estratégias eficientes para mitigar os impactos ambientais associados à presença de fósforo em efluentes, com benefícios significativos para a preservação da qualidade dos recursos hídricos, e os métodos físico-químicos são, na maioria dos casos, auxiliares ou complementares (MOTA; VON SPERLING, 2009).

Arenhart (2019) aborda sobre a eficácia do método biológico, embora destaque fatores que limitam o uso generalizado desse processo. Esses fatores geram um problema crítico que dificulta o alcance do cumprimento das regularizações relacionadas à qualidade do efluente final.

A ideia apontada pelos autores em seus respectivos estudos sobre processos de remoção de Fósforo por métodos biológicos ou físico-químicos consta na Quadro 2 a seguir:

Quadro 2 - Comparação dos Processos de Remoção de Fósforo

Aspectos	Remoção Físico-Química	Remoção Biológica
Vantagens	Alta eficiência	Baixo consumo de produtos químicos
	Resposta rápida a variações	Processo sustentável, envolvendo microorganismos naturais
Desvantagens	Geração de resíduos de lodo	Sensibilidade a variações operacionais
	Consumo significativo de produtos químicos	Necessidade de manutenção constante
	Custos operacionais mais elevados	Processo complexo de implementar

Fonte: Elaborada pela autora 2023.

A eficiência de remoção de fósforo em ETE pode variar amplamente com base nas tecnologias empregadas. O Quadro 3 abaixo apresenta as três principais tecnologias descritas neste estudo, que por sua vez, são comumente utilizadas nas ETE e suas eficiências típicas de remoção de fósforo:

Quadro 3 - Processos de Remoção de Fósforo, Eficiências e Sistemas Aplicáveis

<b>Processos de Remoção de Fósforo</b>	<b>Eficiência de Remoção (%)</b>	<b>Sistemas de Tratamento Aplicáveis</b>
Biológicos/ Biorredoxação	30 - 70	Sistemas de Lodo Ativado
Precipitação Química com Sais de Ferro ou Alumínio	85 - 95	Tratamento convencional, geralmente como parte de um tratamento secundário
Adsorção em Materiais Filtrantes	80 - 95	Polimento para remover o fósforo residual após o tratamento biológico

Fonte: Autora, 2023.

Os processos biológicos de remoção de fósforo, podem ser integrados a sistemas de lodos ativados para remover fósforo de efluentes. Essa é uma abordagem frequentemente utilizada como uma etapa de pós-tratamento para remover o fósforo residual após o tratamento biológico. Segundo Metcalf e Eddy (2016), trata-se de uma combinação eficaz para alcançar altas eficiências de remoção de fósforo.

A técnica de precipitação química com sais de ferro ou alumínio pode ser aplicada em uma variedade de sistemas de tratamento de esgoto, dependendo das necessidades específicas de remoção de fósforo e das características do efluente a ser tratado (METCALF e EDDY, 2016). Já a Adsorção em Materiais Filtrantes é uma técnica frequentemente usada como etapa de polimento para remover o fósforo residual após o tratamento biológico.

## 2.5 ALTERNATIVAS PARA REÚSO DO FÓSFORO

Existem diversas técnicas para remover o Fósforo das águas residuais, mas além de retirar o Fósforo, é possível extraí-lo e reciclá-lo. Segundo Marin (2021), uma das estratégias para melhorar a administração e a sustentabilidade do uso das fontes desse elemento.

Nessa perspectiva, a remoção de fósforo de efluentes sanitários e seu posterior reuso em setores diversos, como na agricultura, pode ser encarada como uma alternativa promissora

para prevenir impactos ambientais causados pela eutrofização e minimizar os impactos econômicos da escassez desse recurso.

A estruvita, um composto resultante da precipitação química de fosfato e magnésio em efluentes tratados, representa uma alternativa para a recuperação de fósforo. O método de precipitação da estruvita envolve a adição de uma fonte externa de magnésio, como cloreto de magnésio ou sal marinho, em uma solução que contém fosfato de amônio e amônia, como a urina humana (SANTOS, 2019). Essa reação promove a formação de cristais de estruvita, que são separados da solução e se acumulam no fundo do recipiente. A vantagem desse processo é a obtenção de nutrientes prontamente disponíveis para as plantas, com concentrações mais adequadas e menores índices de metais pesados em comparação com fertilizantes químicos convencionais. Chrispim, Scholz e Nolasco (2019) destacam que o processo de formação da estruvita ocorre em condições específicas de pH, quando há um excesso de fosfato, amônio e magnésio no efluente tratado. A principal aplicação da estruvita reside na agricultura, onde ela atua como um fertilizante de liberação lenta. O fósforo desempenha papel fundamental nos processos celulares, como a formação de DNA, RNA e ATP, além de participar ativamente na fotossíntese e no metabolismo energético (SANTOS, 2019). Assim, a incorporação da estruvita como fertilizante não apenas contribui para a produtividade agrícola, mas também reduz a dependência de fertilizantes sintéticos, promovendo a sustentabilidade e conservação de recursos naturais.

No âmbito do saneamento ecológico, a possibilidade de recuperar fósforo por meio da reciclagem de urina humana se destaca como uma alternativa técnica e sustentável. O estudo conduzido por Barton et al. (2021), apresenta um conjunto de dados que exploram as atitudes dos consumidores de alimentos nas universidades em relação a essa prática inovadora, que envolve a separação da urina do restante dos resíduos e a utiliza como fertilizante para o cultivo de alimentos. A pesquisa, envolvendo 3.763 membros da comunidade universitária de 20 instituições em 16 países, apresentou resultados que mostraram que há uma disposição geral entre os consumidores para reciclar a urina humana como fertilizante para culturas. No entanto, a disposição de pagar um preço por esses alimentos varia. Com essas informações é possível compreender as perspectivas de implementação de sistemas de reciclagem, e incentivar o desenvolvimento de futuras pesquisas nessa área.

### 2.5.1 Reúso da Fração Líquida do Fósforo

O reúso de efluentes brutos, após um tratamento preliminar, pode ser uma alternativa para a utilização agrícola. No entanto, é necessário um tratamento adequado para remover patógenos e reduzir os riscos à saúde pública. O fósforo presente no efluente bruto pode servir como fonte de nutrientes para as culturas agrícolas, substituindo ou reduzindo a necessidade de fertilizantes sintéticos (Kleinman et. al., 2011).

O reúso de efluentes tratados, após processos de remoção de fósforo, é uma opção mais segura e eficiente. O fósforo recuperado pode ser utilizado como fonte de nutrientes em sistemas agrícolas, contribuindo para a melhoria da qualidade do solo e reduzindo a dependência de fertilizantes fosfatados convencionais (METCALF & EDDY, 2016). E o efluente tratado contendo fósforo recuperado tem o potencial de reduzir a demanda por fontes naturais de fósforo e diminuir a contaminação ambiental. Segundo Marin (2021), essa prática é oriunda da busca por soluções para o constante aumento da população, conseqüentemente aumento da demanda por água e alimentos. Além disso, a utilização de efluentes tratados em diferentes setores, como a agricultura, sistemas de irrigação e indústria, podem promover a economia de água e a gestão integrada de recursos hídricos e naturais (KREUTZBERGER, 2017).

A remoção e reutilização de fósforo dos efluentes tratados, na fração líquida devem ser realizadas de acordo com as exigências ambientais e de saúde pública. A Organização Mundial de Saúde (OMS) estabelece diretrizes para o uso seguro de águas residuais tratadas e de produtos provenientes do tratamento de efluentes. A qualidade dos efluentes tratados deve ser monitorada e controlada para garantir que não haja riscos à saúde da população ou contaminação ambiental (KREUTZBERGER, 2017).

Em abrangência nacional, a ABNT nº 13.969, de 1997, a norma que classifica a água de reúso, quanto à forma de aproveitamento, Moura et al., (2020, p. 797) acrescenta a tudo isso mais um fator:

“Não há legislações específicas e padrões reguladores no país para dar suporte a esse instrumento de gestão ambiental, que garantam a qualidade e a segurança na utilização da água de reúso para contato primário, muito menos para o consumo humano.”

Moura et al. (2020), salienta que ainda são necessárias pesquisas, discussões e debates para definir os critérios de segurança à utilização da água de reúso, sejam para fins potáveis, sejam para fins não potáveis. Pois, analisando um cenário de escassez hídrica extrema, há uma perspectiva de que esse recurso possa ser empregado como uma estratégia eficaz de gestão dos recursos hídricos.

### **2.5.2 Reúso da Fração Sólida do Fósforo**

O lodo é um resíduo urbano de ETE, onde, geralmente a destinação final é o aterro sanitário, o que agrava o problema com lixo urbano e vai contra a Política Nacional de Resíduos Sólidos, que prevê a redução de resíduos sólidos urbanos úmidos dispostos em aterros sanitários, e podem representar até 60% do custo operacional de uma ETE (GHEORGE IWAKI, 2018). No entanto, esse produto possui potencial para ser reutilizado. O fósforo também pode ser recuperado pela fase sólida, ou seja, o lodo do efluente tratado. Esse subproduto do tratamento pode ser utilizado na agricultura, como insumos agrícolas e fertilizantes. Segundo Chrispim, Scholz e Nolasco (2019), essa alternativa é considerada uma das mais promissoras para a recuperação de fósforo, pois o lodo de esgoto é uma fonte rica em nutrientes, incluindo fósforo. Sua aplicação no solo vem sendo utilizada em muitos países como fonte de nutrientes, e como fonte de matéria orgânica para o solo, com efeitos benéficos ao crescimento e desenvolvimento das culturas, e conforme afirma Gheorge Iwaki (2018), essa técnica é a mais adequada em termos técnicos, econômicos e ambientais, desde que o material possua as características necessárias em termos de segurança e saúde.

O reúso da fração sólida do fósforo tem várias vantagens, incluindo a recuperação de um nutriente valioso que pode ser utilizado como fertilizante, a redução da quantidade de lodo que precisa ser descartado e a redução da dependência de fontes de fósforo não renováveis. No entanto, essa alternativa também tem algumas limitações, como a necessidade de secagem do lodo, que pode aumentar os custos do processo, e a necessidade de tratamento químico para solubilizar o fósforo, que pode gerar resíduos químicos que precisam ser tratados adequadamente. (CHRISPIM; SCHOLZ; NOLASCO, 2019).

Em relação ao reúso do lodo proveniente de ETE, a legislação e as recomendações de saúde são fundamentais para garantir práticas seguras e ambientalmente responsáveis. No Brasil, a Resolução CONAMA nº 375/2006 estabelece critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em ETE e seus produtos derivados. Este documento

regula aspectos relacionados à redução de patógenos e à atratividade de vetores nos lodos, visando à sua aplicação segura na agricultura (GHEORGE IWAKI, 2018).

### **3 METODOLOGIA**

#### **3.1 METODOLOGIA UTILIZADA PARA LEVANTAMENTO DE DADOS**

Este trabalho de conclusão de curso assume um caráter descritivo, caracterizado por um levantamento bibliográfico na literatura científica, bem como pela consulta em fontes de dados documentais. A coleta de informações foi conduzida mediante a compilação de pesquisas previamente publicadas, obtidas em bases de dados eletrônicas: Scientific Electronic Library Online (SciELO), Repositório CAPES, Science Direct, Web of Science e Scopus, ANA - Agência Nacional das Águas e SNIS - Sistema Nacional De Informações Sobre Saneamento.

O Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) é uma base de dados governamental que disponibiliza informações sobre águas no Brasil, contribuindo para a difusão do conhecimento sobre recursos hídricos. Através do Painel do Saneamento, uma fonte de dados de acompanhamento de indicadores e informações referentes ao saneamento básico em Santa Catarina, foi possível explorar os indicadores qualitativos sobre a atenção ao Fósforo nos efluentes.

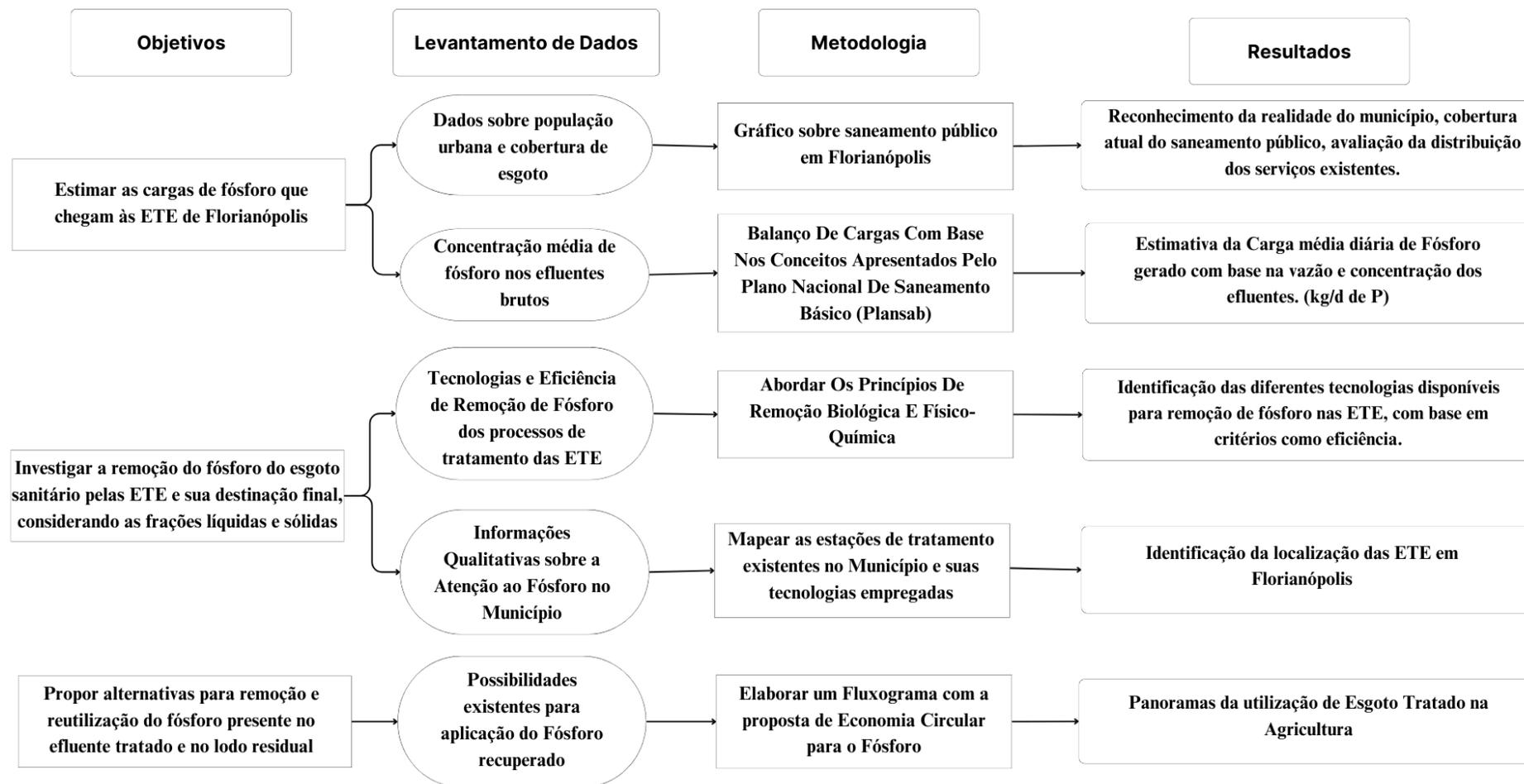
As informações específicas sobre o saneamento básico em Florianópolis, referentes à 2020, foram coletadas no Infosanbas, uma plataforma colaborativa para estudo e criação de representações visuais para dados relacionados ao saneamento básico no Brasil. A Agência Nacional de Águas (ANA), disponibiliza informações sobre os sistemas de tratamento existentes no município, através da publicação ATLAS Esgotos: Despoluição de Bacias Hidrográficas foram coletados dados das vazões que chegam às estações de tratamento de efluentes. Para compreender a infraestrutura de tratamento de efluentes no município de Florianópolis foram utilizados dados disponíveis no GeoPortal de Florianópolis, uma plataforma que permite acesso à Infraestrutura de Dados Espaciais.

Com o objetivo de mapear as ETE identificadas em Florianópolis, procedeu-se à coleta de informações sobre a localização dessas instalações. Realizou-se consulta ao catálogo de metadados da Agência Nacional de Águas (ANA) de 2019, e ao Sistema Nacional de

Informações sobre Saneamento (SNIS) de 2022. A compilação e análise dessas informações foram efetuadas por meio do software QGIS, permitindo a elaboração de um mapa que viabiliza a identificação precisa das ETE no âmbito dos limites administrativos do município. Esse recurso cartográfico proporciona uma perspectiva da distribuição geográfica dessas unidades no contexto municipal.

A Figura 2 mostra o detalhamento da matriz estruturante, que ilustra a metodologia utilizada para alcançar os objetivos propostos considerando critérios quantitativos.

Figura 2 – Fluxograma Metodológico.

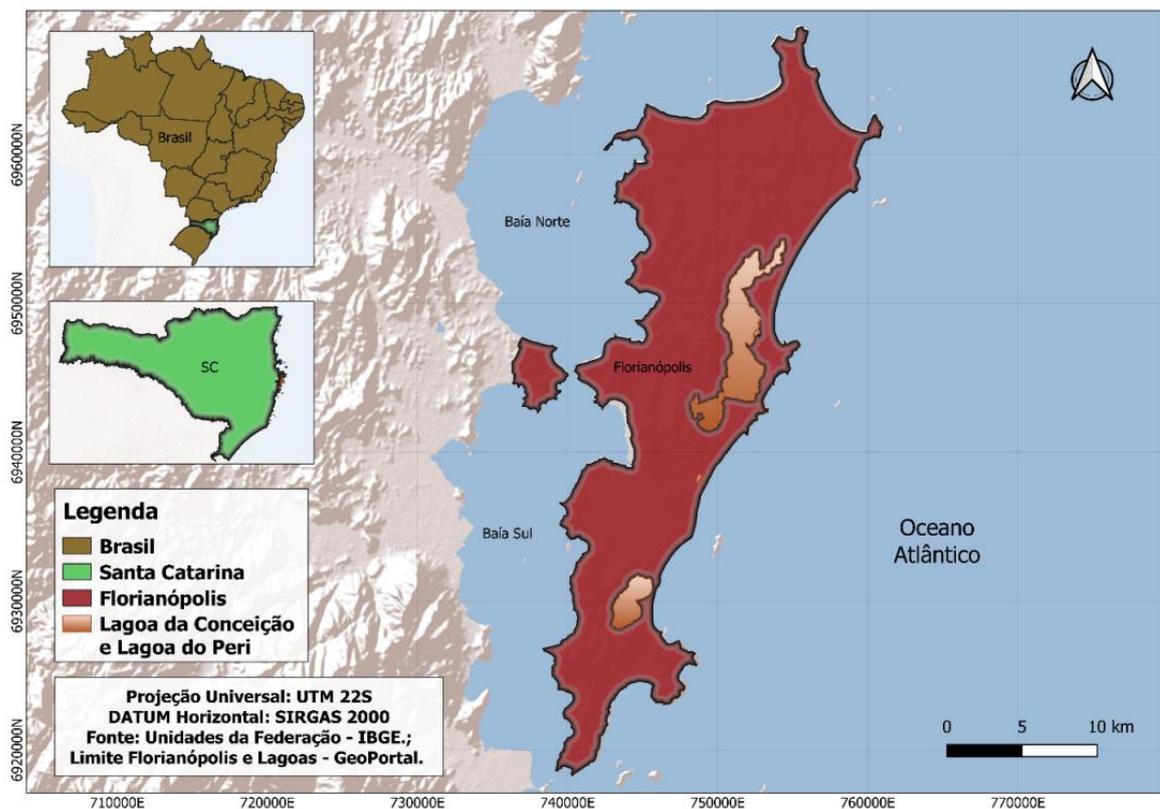


Fonte: Autora, 2023.

### 3.2 LOCAL DE ESTUDO

A área de estudo deste trabalho é o município de Florianópolis, a capital do Estado de Santa Catarina no Brasil. Sua localização geográfica está situada na região sul do país, na costa leste, em contato direto com o Oceano Atlântico, e ocupa uma extensão territorial insular de 656,19 km<sup>2</sup>, e uma pequena área continental de 18,69 km<sup>2</sup> (BERNARDO, 2023, p.34). A Figura 3 ilustra o mapa de sua localização.

Figura 3 – Mapa de Localização do município de Florianópolis.



Fonte: Autora, 2023.

A ocupação inicial do território catarinense ocorreu originalmente por indígenas. A colonização europeia teve início no século XVII, com a chegada de imigrantes açorianos e portugueses, mas o século XIX testemunhou uma migração em massa, especialmente de alemães e italianos. Esse período, marcado por uma colonização predominantemente rural, coincidiu com um notável processo de urbanização que foi crucial para a formação dos centros políticos, administrativos e comerciais do estado (SOUZA, 2023).

Sob uma perspectiva morfológica, a área municipal de Florianópolis exibe uma caracterização geológica distinta, pode ser dividido em maciços rochosos, ocorrendo sob a

forma de morros altos, escarpados, com planícies costeiras sedimentares (BERNARDO, 2023). Dessa forma, sua geodiversidade pode ser enquadrada em dois domínios geomorfológicos principais: o embasamento cristalino representado pelas unidades geológicas do Escudo Catarinense e Formação Serra Geral e a planície costeira representada pelos sedimentos de origem continental, transicional e marinha (BERNARDO, 2023).

A altitude é um fator relevante considerado para classificação climática de Köppen-Geiger, sendo definida por subtropical pertencente ao Grupo C e tipo Cfa. Quanto ao regime de precipitação, a precipitação anual média da área de estudo é de aproximadamente 1.550 mm (BERNARDO, 2023).

Em termos de economia, Florianópolis possui uma diversificada base econômica, que inclui setores como turismo, tecnologia da informação, comércio, serviços, pesca e agricultura. Além disso, o setor de tecnologia da informação e comunicação tem crescido substancialmente, tornando-se um polo de inovação no país.

Quando se trata de saneamento básico, Florianópolis enfrenta desafios significativos. Embora a cobertura de tratamento de esgoto contemple todo o município, os outros pilares do saneamento básico, como o acesso à água potável, coleta e tratamento de resíduos sólidos e drenagem urbana, ainda são questões em andamento. Além disso, a eficiência nos sistemas de coleta e tratamento de efluentes devem ser eficientes e suficientes para evitar impactos negativos no meio ambiente local.

O desenvolvimento econômico e a qualidade de vida oferecida pela cidade vem impulsionando o crescimento da população de Florianópolis ao longo dos anos. A população é de 516.524 habitantes, de acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (2022). Esse aumento populacional, no entanto, coloca pressão adicional sobre os serviços de saneamento, infraestrutura urbana e gestão ambiental.

### 3.3 BALANÇO DE MASSA

A Metodologia de Balanço de Massa teve como base os conceitos apresentados pelo Plano Nacional de Saneamento Básico – PLANSAB, e foi adaptada a fim de observar a distribuição das parcelas de Fósforo gerado nos efluentes do município. A estimativa de cada parcela da carga de Fósforo associada ao efluente foi realizada mediante a integração de dados de cobertura de esgoto, eficiências de remoção e os processos específicos de tratamento adotados. Essa metodologia foi aplicada para as 10 Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) situadas em Florianópolis. Importante destacar que a carga de fósforo esta relacionada com a quantidade proveniente da população atendida pela rede pública. As soluções individuais, como fossas sépticas, não foram o objeto de análise neste trabalho, contudo, indicam que as cargas de fósforo lançadas no meio ambiente, são ainda maiores do que as estimadas neste estudo.

O cálculo do Balanço de Massa, conforme o Plano Nacional de Saneamento Básico, é um procedimento técnico que visa quantificar e avaliar as entradas e saídas de substâncias, como fósforo, nas ETE. Nesse processo, foram considerados os seguintes parâmetros: a concentração de fósforo nos efluentes, as vazões afluente e efluente, e a eficiência do sistema de tratamento em remover o fósforo. O cálculo das cargas de Fósforo, objeto do presente estudo, é definido pela Equação 1:

$$\text{Carga} = \text{concentração} \times \text{vazão} \quad \text{Equação (1)}$$

Para a carga de saída da Estações de Tratamento de Efluentes foi estimada através da equação de eficiência de remoção, apresentado na Equação 2:

$$E = \frac{\text{Carga P bruta} \times \text{Carga P tratada}}{\text{Carga P bruta}} \quad \text{Equação (2)}$$

$$\text{Carga P tratada} = (1 - E) * \text{Carga P bruta} \quad \text{Equação (2)}$$

Esses dados fornecem uma base para a determinação e avaliação da carga de fósforo nos efluentes que chegam às ETE, assim como, a carga final que é lançada no meio ambiente. Desta maneira, é possível ter uma visão abrangente e analítica do impacto ambiental gerado

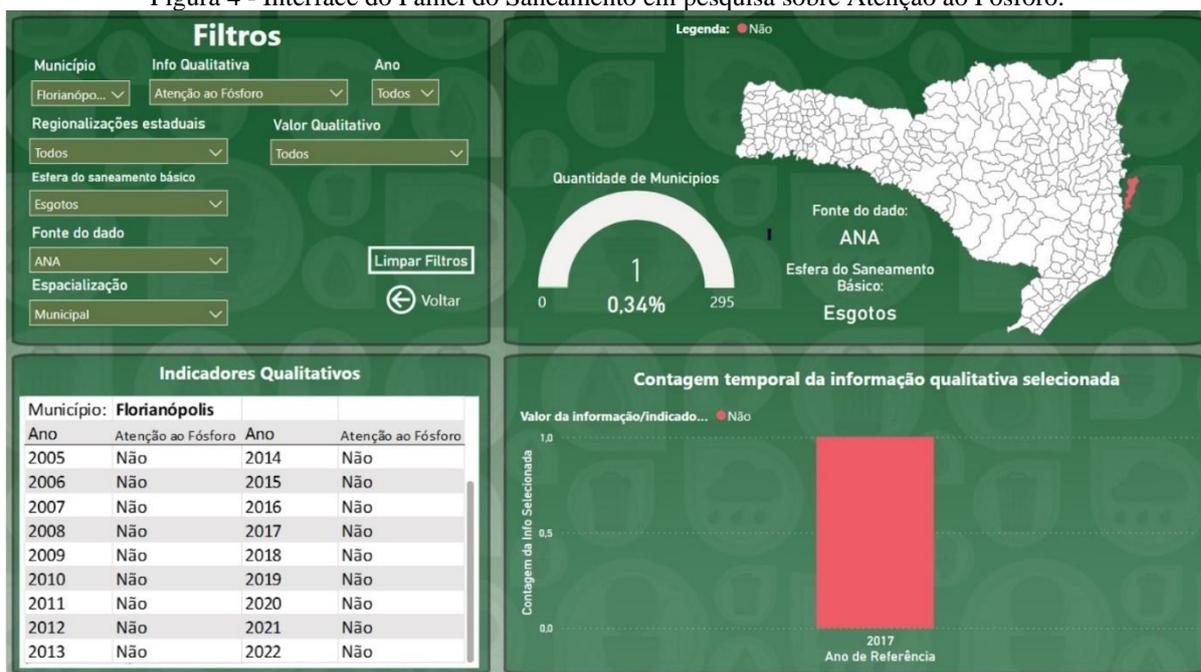
pelo tratamento de efluentes e o potencial para tornar as ETE em uma unidade de recuperação de recursos.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 LEVANTAMENTO DE DADOS SOBRE FÓSFORO NO ESGOTO SANITÁRIO DE FLORIANÓPOLIS

A Figura 4, extraída do Painel do Saneamento, ilustra a interface de pesquisa sobre os indicadores qualitativos à atenção ao Fósforo nos efluentes. A análise desses dados revelou que o município de Florianópolis, como um todo, carece de atenção em relação às cargas de Fósforo na esfera do saneamento básico.

Figura 4 - Interface do Painel do Saneamento em pesquisa sobre Atenção ao Fósforo.



Fonte: portal da ANA, 2021.

Os Indicadores qualitativos históricos evidenciam a ausência de foco do município na gestão das cargas de fósforo geradas e lançadas nos corpos hídricos. Essa abordagem metodológica proporciona uma compreensão sobre a situação atual do município, e contribui para a identificação de lacunas e áreas que requerem maior atenção e intervenção em termos de gestão sustentável de recursos hídricos.

O Sistema Nacional De Informações Sobre Saneamento (SNIS), é o maior sistema de informações do setor de saneamento brasileiro. É uma unidade vinculada à Secretaria Nacional de Saneamento (SNS) do Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR). Esse sistema reúne informações de caráter institucional, administrativo, operacional, gerencial, econômico-financeiro, contábil e de qualidade da prestação de serviços de saneamento básico em áreas urbanas das quatro componentes do saneamento básico, com abrangência nacional. Segundo esse sistema, a Prefeitura Municipal de Florianópolis declarou que possui Política e Plano Municipal de Saneamento Básico, e que 57,84% do esgoto é coletado e 100,00% do esgoto coletado é tratado.

O Quadro 4 resume as informações da pesquisa realizada na plataforma Infosanbas. Esse quadro apresenta dados específicos sobre o percentual de esgoto coletado e tratado pelo prestador de serviço de esgotamento sanitário em Florianópolis, tendo a Companhia Catarinense de Águas e Saneamento (CASAN) como responsável por esse serviço. Além disso, o quadro fornece informações referentes à média das tarifas aplicadas aos domicílios no município e a população atendida. É importante destacar que os valores percentuais destacados do quadro representam o índice de tratamento de esgoto conforme declarado pelos prestadores de serviços ao Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS).

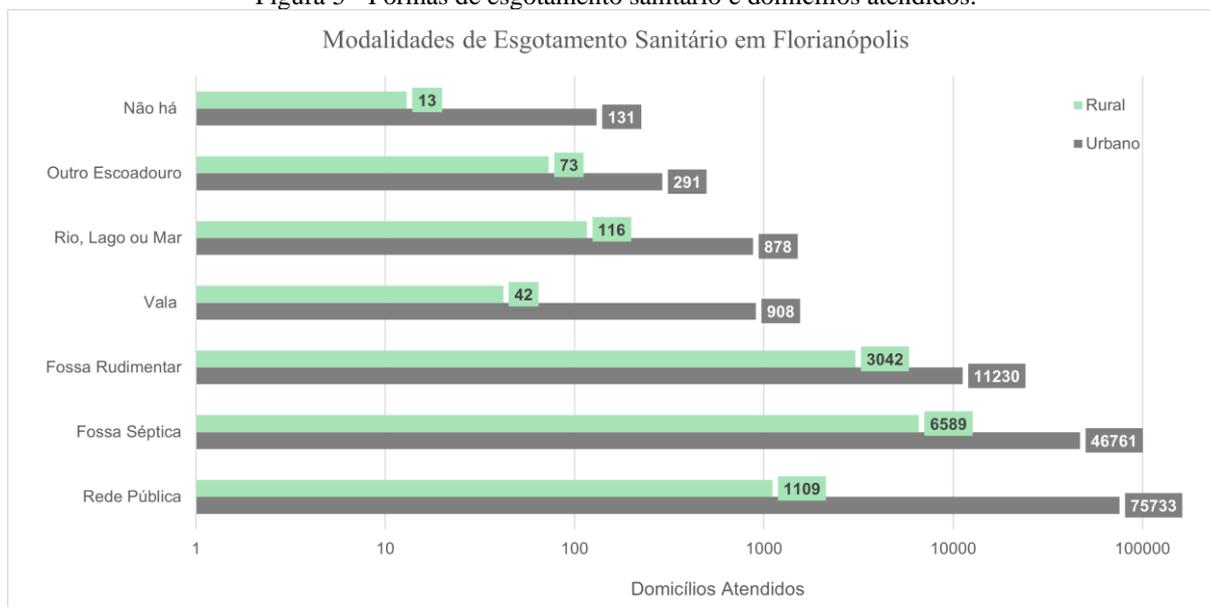
Quadro 4 - Dados específicos sobre o saneamento básico em Florianópolis.

Responsável pelo serviço de esgotamento sanitário	Companhia Catarinense de Águas e Saneamento - CASAN
Tarifa média de esgoto	R\$ 7,15/m <sup>3</sup>
Índice de coleta de esgoto	65,14%
Índice de tratamento de esgoto	100%
População total atendida com esgotamento sanitário	339.430 pessoas

Fonte: SNIS/Infosanbas (2020); Casan (2021).

A Figura 5 apresenta a distribuição das diferentes modalidades de esgotamento sanitário em áreas urbanas e rurais, destacando-se por meio de cores distintas. As barras coloridas representam a proporção e a quantidade de domicílios em ambientes urbanos e rurais que adotam uma das sete formas de esgotamento sanitário previamente definidas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

Figura 5 - Formas de esgotamento sanitário e domicílios atendidos.



Fonte: Infosnbas, 2020.

A distribuição demográfica da cidade também é relevante para a análise das cargas de fósforo nos efluentes. Áreas densamente povoadas, como bairros urbanos e áreas turísticas, podem contribuir significativamente para as cargas de fósforo nos sistemas de tratamento. Além disso, a composição socioeconômica da população pode influenciar os padrões de consumo de produtos que contêm fósforo, afetando as concentrações e proporções desse nutriente nos efluentes domésticos.

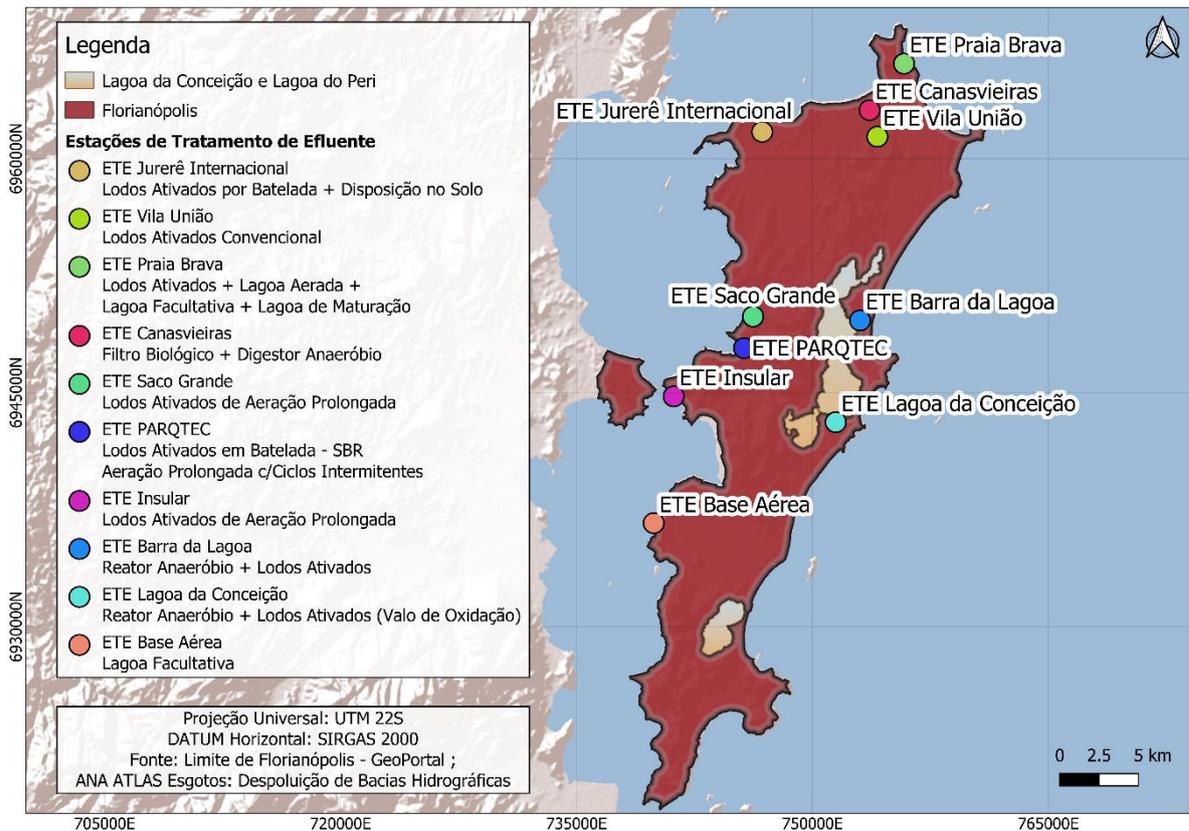
No desenvolvimento deste trabalho, a concentração média de fósforo foi estabelecida mediante uma análise crítica e comparativa de dados provenientes de três fontes de estudo distintas. Quevedo, Piveli e Paganini (2017) forneceram dados específicos relacionados às Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) investigadas, revelando uma faixa de concentração de fósforo total entre 5,3 a 7,6 mg/L. Metcalf e Eddy (2016), indicam que as concentrações típicas de fósforo em efluentes domésticos brutos, possuem valores de 3,7 para baixa, 5,6 para média e 11,0 para alta concentração, em mg/L. Para Sousa (2016) a concentração média de Fósforo no efluente foi de 7,26 mg/L. Considerando as fontes citadas, optou-se pela escolha do valor de 7,0 mg/L, como representativo da concentração média de fósforo nos efluentes tratados em Florianópolis. Esta escolha se baseia nos dados locais para Florianópolis, por se tratar de um município com mais de 500.000 de habitantes, além de estar em conformidade com as faixas de referência apresentadas por Von Sperling (2005) e Jordão e Pessoa (2011),

de 3 a 9 mg/L e de 3 a 13 mg/L, respectivamente, para concentrações médias de fósforo em efluentes brutos.

#### 4.2 TECNOLOGIAS E EFICIÊNCIAS DE REMOÇÃO DE FOSFORO DAS ETE DE FLORIANÓPOLIS

A consolidação das informações da obtidas na fonte da dados da ANA, SNIRH e GeoPortal de Florianópolis, viabilizaram identificar e catalogar as 10 ETE que estão operantes na região. A Figura 6 apresenta o mapeamento das estações de tratamento existentes em Florianópolis, destacando suas localizações geográficas e as respectivas tecnologias de tratamento de efluentes adotadas, possibilitando a compreensão da distribuição geoespacial das ETE.

Figura 6 - Mapeamento Das Estações De Tratamento Existentes No Município E Suas Tecnologias.



Fonte: Autora, (2023).

O tratamento por lodos ativados é o método predominante dentre as 10 ETE identificadas. A ETE Base Aérea opera com o tratamento por Lagoas Facultativas. A ETE

Praia Brava também possui um sistema composto por Lagoa Aerada, Lagoa Facultativa e Lagoa de Maturação, somado ao tratamento por lodos ativados. A ETE Vila União trata os efluentes por lodos ativados Convencional. As ETE Jurerê Internacional e PARQTEC possuem tratamento por lodos ativados em Bateladas. As ETE Saco Grande e Insular possuem lodos ativados de Aeração Prolongada. O tratamento por lodos ativados também permite sua associação com processos anaeróbios, como acontece nas ETE Lagoa da Conceição e Barra da Lagoa. Por fim, a ETE Canasvieiras, recentemente reformada, possui tratamento através do filtro biológico somado a um digestor anaeróbio. Esta variação sugere que as estratégias de tratamento biológico são eficientes e podem ser adaptadas para remoção eficiente de fósforo. O Quadro 5 apresenta de forma detalhada as ETE, as modalidades específicas de tratamento adotadas em cada estação e suas correspondentes vazões afluentes e efluentes, constatando que, essas vazões são idênticas. A eficiência do tratamento está associada ao critério de remoção de fósforo em virtude das tecnologias empregadas nos sistemas.

Quadro 5 - Dados sobre as ETE de Florianópolis.

ETE	Nome	Modalidade Específicas	Vazão Afluente	Eficiência Remoção Fósforo
			L/s	%
1	ETE Jurerê Internacional	Lodos Ativados por Batelada + Disposição no Solo	24,1	70
2	ETE Vila União	Lodos Ativados Convencional	1	75
3	ETE Praia Brava	Lodos Ativados + Lagoa Aerada + Lagoa Facultativa + Lagoa de Maturação	15	80
4	ETE Canasvieiras	Filtro Biológico + Digestor Anaeróbio	156	90
5	ETE Saco Grande	Lodos Ativados de Aeração Prolongada	5,5	80
6	ETE PARQTEC	Lodos Ativados em Batelada - SBR Aeração Prolongada c/Ciclos Intermitentes	2,9	85
7	ETE Insular	Lodos Ativados de Aeração Prolongada	272	80
8	ETE Barra da Lagoa	Reator Anaeróbio + Lodos Ativados	37	75
9	ETE Lagoa da Conceição	Reator Anaeróbio + Lodos Ativados (Valo de Oxidação)	35	75
10	ETE Base Aérea	Lagoa Facultativa	4,6	50

Fonte: Autora, (2023).

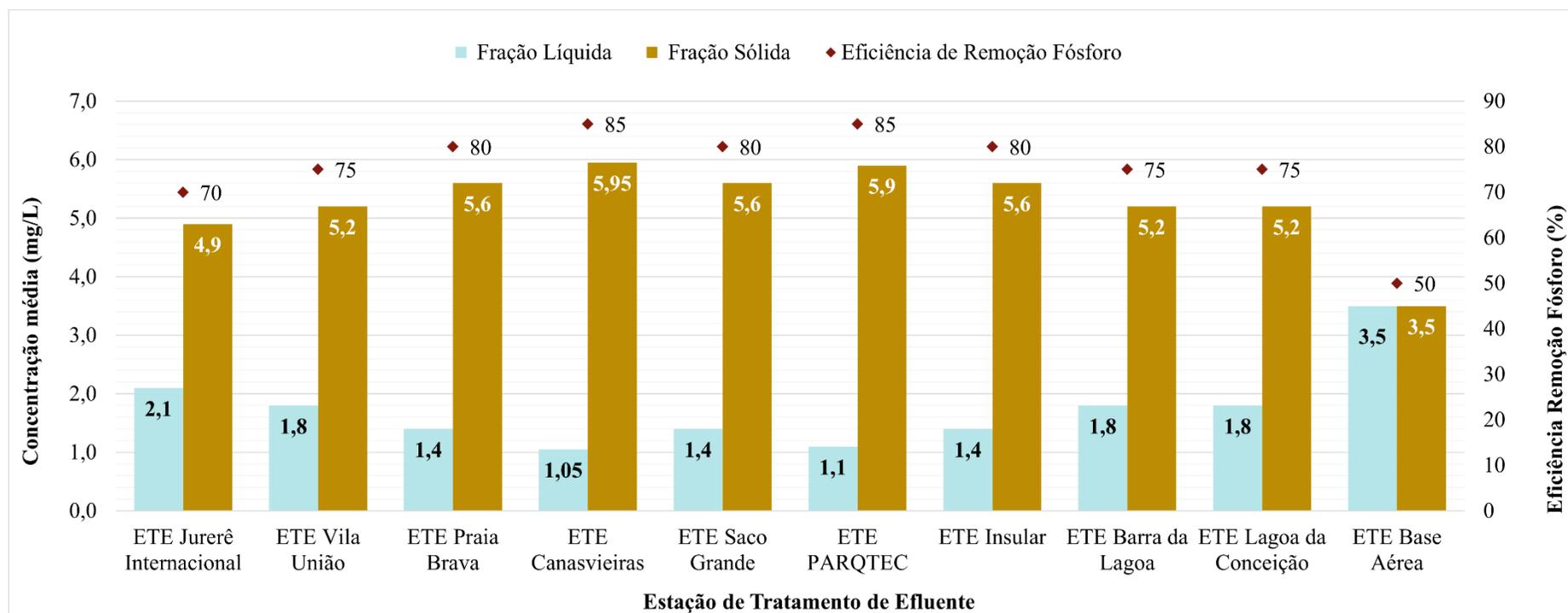
#### 4.3 DESTINAÇÃO FINAL DO FÓSFORO REMOVIDO DOS ESGOTO SANITÁRIO PELAS ETE DE FLORIANOPOLIS

A Figura 7 apresenta o gráfico das concentrações de fósforo na fração sólida e fração líquida, com base nas eficiências de remoção de fósforo. A concentração de fósforo na fração sólida representa a quantidade retida pelos processos de remoção, enquanto a fração líquida indica o fósforo presente na água tratada. A representação gráfica facilita a identificação de pontos específicos no processo onde a eficiência pode ser otimizada. Mesmo não havendo uma atenção especial ao Fósforo nos sistemas de tratamento de efluentes do município, o tratamento biológico se mostra eficaz.

Os resultados do balanço de massa de fósforo presente nos efluentes domésticos e que chegam às ETE, com base nas vazões e concentrações estão apresentados na Figura 8. Este é dividido em três barras coloridas: A barra vermelha representa a carga bruta de Fósforo que chega à ETE, em quilograma por dia, incluindo tanto a fração sólida quanto a fração líquida. As barras marrom e azul representam as cargas de fósforo da fração sólida e fração líquida, respectivamente.

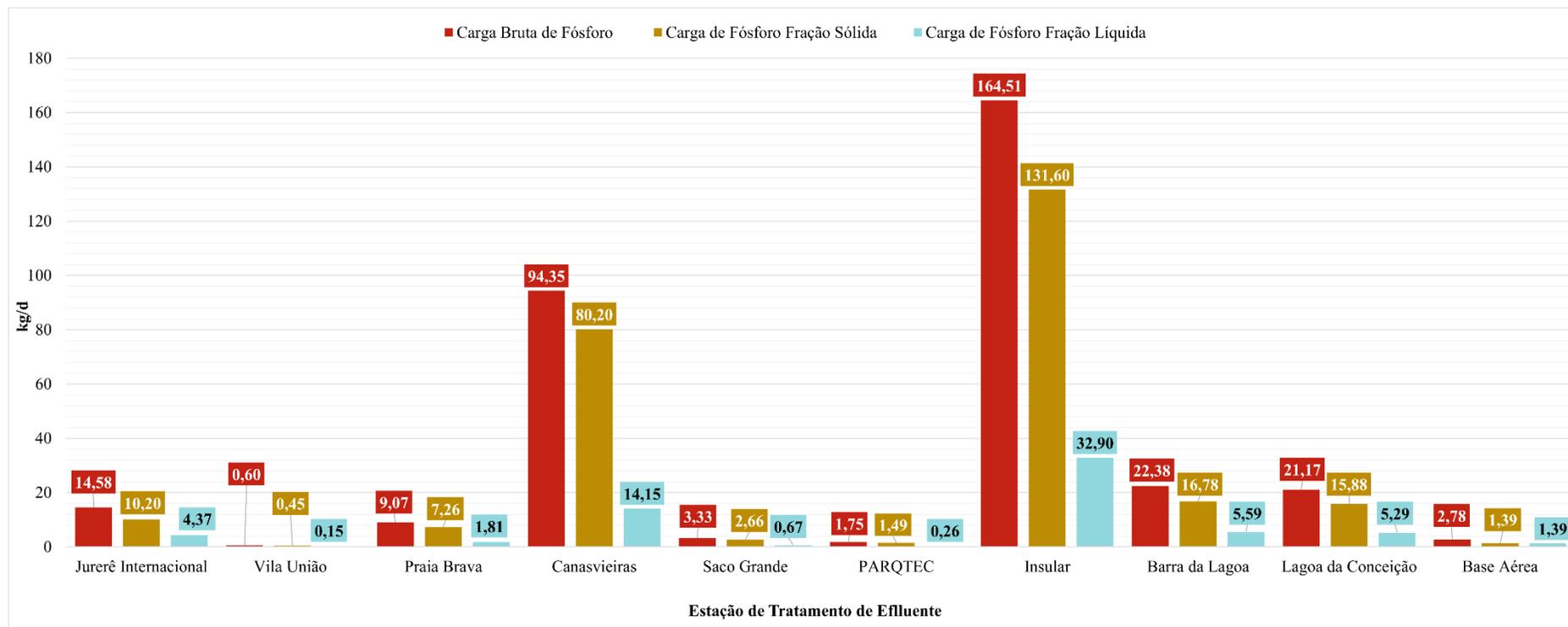
A ETE Insular e Canasvieiras recebem as maiores cargas de fósforo, devido às grandes vazões de esgoto que tratam por dia, com uma média de 165 kg e 95 kg, respectivamente. O gráfico evidencia que as ETE de Florianópolis tratam uma quantidade significativa de fósforo diariamente, e a disposição final da fração sólida é o aterro sanitário ou transformado em gás metano, no reator anaeróbio, para ser queimado, e a fração líquida é lançada nos corpos receptores.

Figura 7 – Concentração Média de Fósforo nas ETE.



Fonte: Autora, (2023).

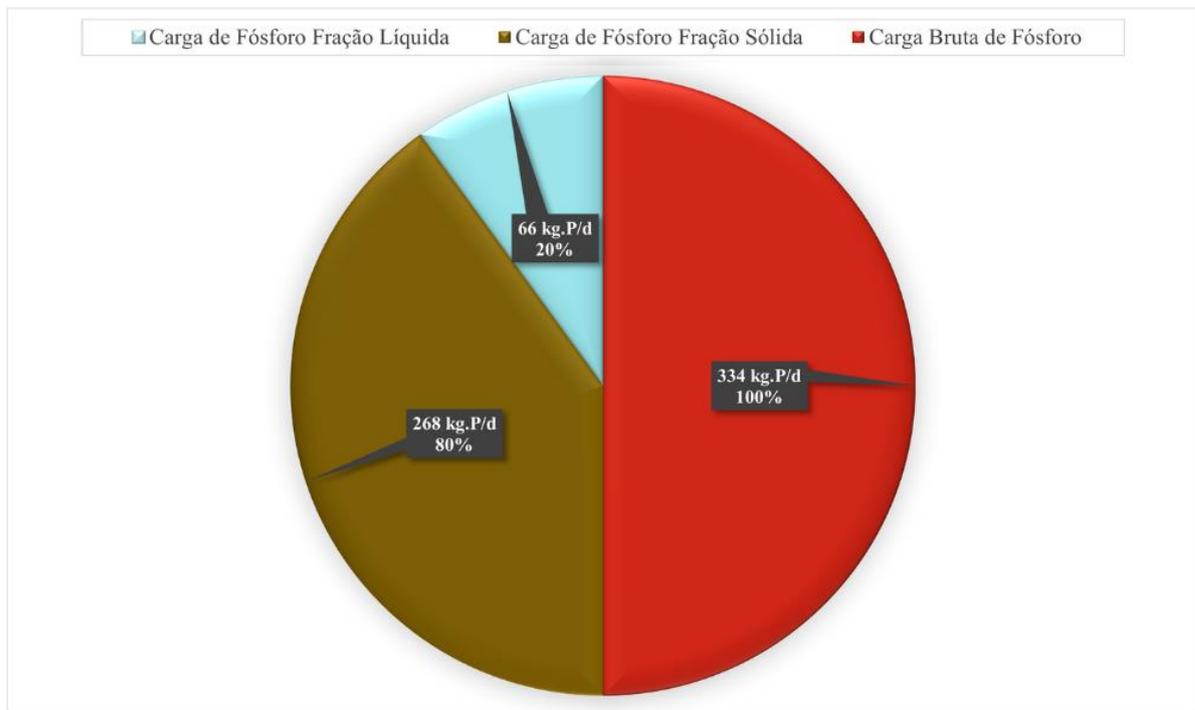
Figura 8 – Estimativas das Cargas de Fósforo.



Fonte: Autora, (2023).

A Figura 9 resume o somatório das cargas de fósforo diárias, comparando a carga bruta com as distribuições entre a fração sólida e fração líquida.

Figura 9 – Carga de Fósforo Diária nas ETE.



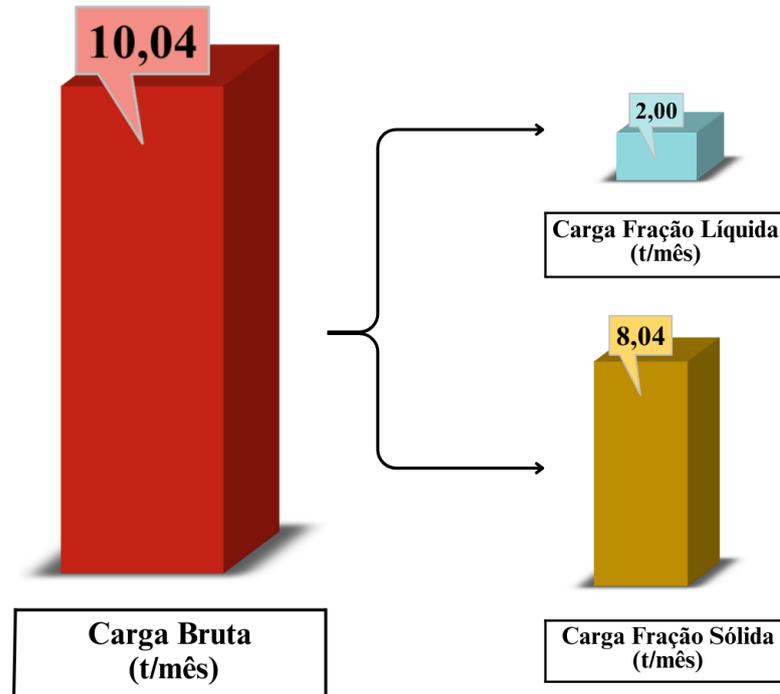
Fonte: Autora, (2023).

As ETE de Florianópolis tratam um total de aproximadamente 334 kg de fósforo por dia. A fração sólida de fósforo representa, em média, 80% da carga total de fósforo, indicando que a quantidade de fósforo removido pelos processos adotados nas ETE são significativos. A fração líquida representa, em média, 20% da carga total de fósforo, destacando a eficácia dos sistemas de tratamento em reduzir a presença de fósforo na água tratada. No entanto, a média de eficiência de remoção de 80% na fração sólida sugere que ainda há espaço para melhorias nos processos de tratamento. Essa lacuna identificada aponta para uma oportunidade de aprimorar os processos de remoção de fósforo.

Os resultados apresentados através dos esquemas a seguir apresentam uma análise temporal sobre a distribuição da carga de fósforo que chegam nas ETE de Florianópolis. A Figura 10 apresenta o montante de carga mensal. A carga bruta totaliza 10 toneladas em um mês. Destes, 8 toneladas são removidos representando a fração sólida, e 2 toneladas permanecem na fração líquida. A Figura 11 representa a carga de fósforo anual, totalizando 122 toneladas por ano, que destas, 98 toneladas foram removidos como fração sólida (lodo), e

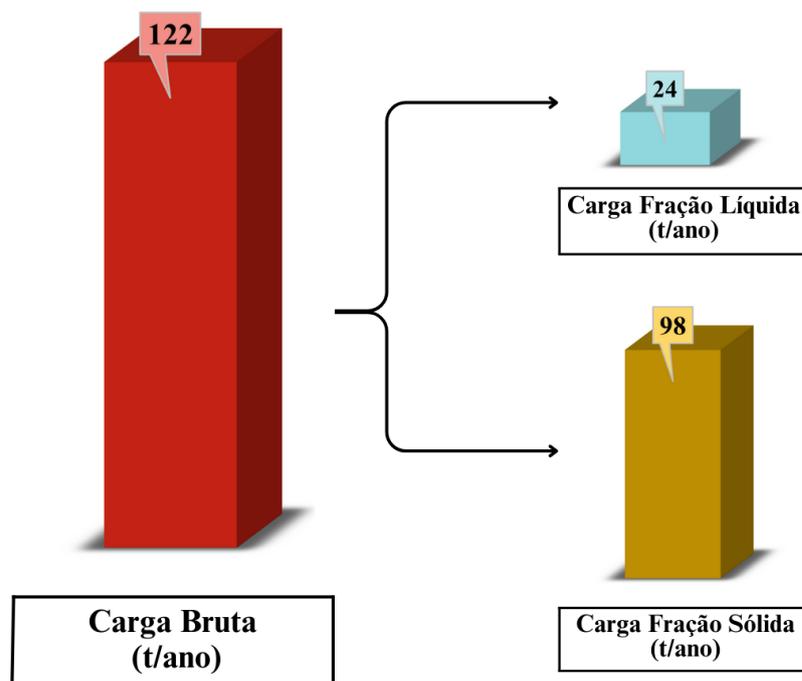
24 toneladas permanecem na fração líquida, permitindo identificar as tendências de longo prazo.

Figura 10 - Carga de Fósforo nas ETE em um mês



Fonte: Autora, (2023).

Figura 11 - Carga de Fósforo nas ETE em um ano.



Fonte: Autora, (2023).

#### 4.4 POTENCIALIDADES DE REÚSO DO FOSFORO NO CONTEXTO DE RECUPERAÇÃO DE RECURSOS

Como discutido na revisão bibliográfica, os efluentes de tratamento de águas residuárias domésticas representam uma potencial fonte de remoção de fósforo. Florianópolis possui diversas ETE com tecnologias capazes de adaptar-se a sistemas mais específicos de remoção de fósforo, incluindo a precipitação química com sais de ferro ou alumínio, e a adsorção (LEITE, 2022). E até mesmo otimizar a remoção de fósforo nos sistemas de tratamento biológicos, conforme aponta Mota e Von Sperling (2009), para reaproveitar substâncias dos efluentes, com foco no fósforo, e convertê-las em um produto de valor. Essas tecnologias já existem, inclusive no Brasil, mas ainda é uma experiência limitada. Entretanto, representam o início da transição para um sistema circular de tratamento de efluentes.

Com o tratamento voltado para remoção de fósforo, ocorre uma transferência de massa do fósforo dissolvida para a fração sólida. Com a utilização de sulfato de alumínio, na etapa de polimento final, é obtido um lodo rico em fósforo, mas com alumínio, além de outros possíveis contaminantes. De acordo com Antero (2020), a presença de alumínio na porção sólida de natureza química pode exercer inibição sobre os processos de digestão anaeróbia, resultando em uma reduzida estabilização da fração sólida. E assim, reduzir as possibilidades de reutilização. Contudo, Santos (2019), afirma que o efluente doméstico possui nutrientes em quantidade suficiente para aplicação na agricultura em forma de fertilizante, sendo a maioria dos nutrientes necessários às plantas, encontrada na urina.

A região possui demanda agrícola significativa (SOUZA, 2023), e o uso de fósforo recuperado da fração sólida dos tratamentos biológicos pode ser utilizado como fertilizante, agindo como potencializador para a produção de culturas. A aplicação da fração líquida de fósforo em irrigação, referida como fertirrigação (PINTO; BASSOI; SOARES, 2021), é uma prática que consiste na aplicação de fertilizantes ou nutrientes diretamente na água de irrigação, permitindo uma distribuição eficiente dos nutrientes diretamente às raízes das plantas. Contudo, no caso do tratamento de esgoto, essa fração líquida não apresenta concentrações elevadas de fósforo, pois encontra-se diluída em uma quantidade substancial de água.

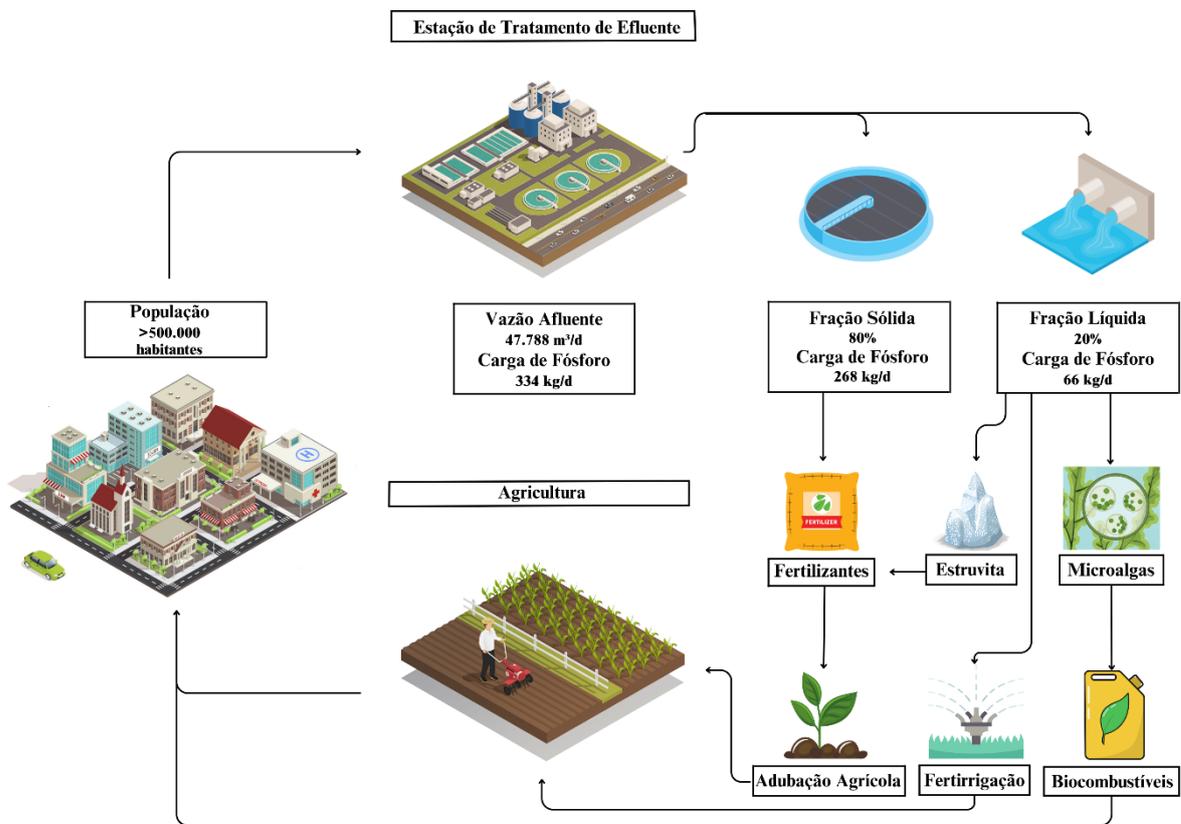
Cecato (2023) investigou o potencial de irrigação agrícola com esgoto tratado em Santa Catarina. Os resultados quantitativos revelam um cenário propício, com vários municípios apresentando um potencial de irrigação igual ou superior a 100%, alguns casos

alcançaram 6.000% de potencial de irrigação com esgoto tratado. Essa análise extensiva sugere que, até 2035, a produção de esgoto poderá não apenas atender à demanda atual de água para irrigação, mas também viabilizar a expansão da agricultura, representando uma solução ambientalmente sustentável.

Nessa perspectiva, surge a oportunidade de transformar as ETE em unidades de recuperação de recursos, visando à reciclagem e reúso de nutrientes como o fósforo. Essa abordagem contribui para a implementação de uma economia circular e práticas agrícolas mais sustentáveis, uma vez que propõe a aplicação desses nutrientes recuperados na agricultura. A gestão integrada resultante dessa prática não apenas agrega valor nos aspectos econômicos e sociais, mas também reduz as cargas diárias de fósforo que os corpos hídricos têm de depurar, bem como as quantidades desse elemento que são destinados aos aterros sanitários. Além disso, ela contribui para a diminuição da dependência de fertilizantes fosfatados convencionais, promovendo, assim, uma maior conscientização sobre os recursos nutricionais. Essa visão integrada se alinha ao conceito emergente de Nexo Alimento, Água e Energia (Food-water-energy Nexus) que enfatiza a interconexão entre água, energia e alimentos na cadeia de produção alimentar. Tseng et al. (2022) ressaltam que essa abordagem envolve o uso eficiente desses recursos, a minimização do desperdício e a redução dos impactos ambientais, promovendo, assim, uma gestão mais equilibrada e sustentável dos recursos essenciais para a produção alimentar.

A Figura 12 ilustra a proposta de economia circular proposto, que inicia com o tratamento dos efluentes domésticos gerados pela população chegando nas ETE. O tratamento resulta na separação do efluente em fração líquida e sólida. A fração líquida recuperada como estruvita, um composto rico de fósforo e nitrogênio, assim como a fração sólida, contendo nutrientes, são direcionadas para a produção de fertilizantes, contribuindo para a agricultura. Além disso, a fração líquida pode ser utilizada na fertirrigação agrícola, ou ser redirecionada para lagoas com microalgas, onde o fósforo é absorvido pelas microalgas, e posteriormente, pode ser utilizado na produção de biocombustíveis. Essa abordagem exemplifica a aplicação do conceito de Nexo Alimento, Água e Energia, integrando o tratamento de resíduos humanos ao setor agrícola e energético, promovendo uma abordagem sustentável e fechando os ciclos de nutrientes e energia.

Figura 12 - Economia Circular proposta para Florianópolis.



Fonte: Autora, (2023).

O fluxograma representa a potencial implementação de uma economia circular em Florianópolis, destacando a recuperação de nutrientes e energia derivados do tratamento de efluentes. A fração sólida, direcionada para a produção de fertilizantes, proporciona uma fonte sustentável de nutrientes para a agricultura local. A fração líquida, recuperada como estruvita, destaca-se como uma alternativa para a fertirrigação, contribuindo para a redução da dependência de fertilizantes convencionais. Além disso, a utilização da fração líquida em lagoas com microalgas demonstra um potencial adicional. Essa prática fornece matéria-prima para a produção de biocombustíveis. Essa abordagem integrada alinha-se aos princípios da economia circular, onde os resíduos são transformados em recursos valiosos.

Contudo, os resultados obtidos podem ser contextualizados com a pesquisa de Lehtoranta et al. (2022) sobre o potencial de recuperação de nutrientes das águas residuais na Europa. A taxa de remoção de fósforo alcançada nos sistemas de recuperação de nutrientes e energia destaca a viabilidade dessas práticas, com o potencial de substituição de até 65% do fósforo mineral. No entanto, a implementação efetiva em Florianópolis exigirá não apenas

avanços tecnológicos, mas também uma transformação abrangente no setor de tratamento de águas residuais e uma mudança de paradigma em direção a uma economia circular.

## 5 CONCLUSÃO

Florianópolis possui 65% de cobertura de saneamento contemplada com rede pública. O levantamento de dados apresentou que 47.787,84 m<sup>3</sup> de esgoto sanitário chegam diariamente e são tratados nas 10 ETE operantes no município, tratando diariamente 334 quilogramas de fósforo. Todas as estações tratam os efluentes por métodos biológicos, como sistemas de lagoas e lodos ativados. Foi possível observar uma diversificada combinação de tecnologias, e a variação da modalidade de lodos ativados pelo método convencional e por bateladas, além de sua combinação com reatores anaeróbios.

Os resultados obtidos por meio da análise do balanço de massa revelaram uma estimativa de 268 kg de fósforo removido diariamente na fração sólida, ou seja, no lodo residual, e 66 kg presente na fração líquida após o processo de tratamento nas ETE investigadas. Estabelecendo uma conexão com o incidente do rompimento da barragem da lagoa de evapoinfiltração (LEI) da Lagoa da Conceição, destacado na introdução, a carga de 0,65 toneladas de fósforo que contaminou a Lagoa da Conceição devido ao rompimento equivale a dois dias de contribuição de carga de fósforo proveniente de todas as ETE do município.

As eficiências de remoção de fósforo foram consistentes, apresentando uma média de 80% de remoção da carga inicial de fósforo no efluente bruto. No entanto, é importante ressaltar que as ETE avaliadas possuem o potencial de serem otimizadas para produzir efluentes com características ideais para atender às demandas específicas de fertilização e irrigação na agricultura.

A transformação das ETE em unidades de recuperação de recursos, através da reciclagem e reutilização de nutrientes, como o fósforo, na agricultura, contribui para a minimização dos impactos negativos nos ecossistemas aquáticos decorrentes das cargas de fósforo, além disso a valorização do fósforo como fertilizante contribui para a redução da dependência de fontes naturais. Promovendo a implementação de uma economia circular, adotando práticas agrícolas mais sustentáveis. Ao direcionar os resíduos das ETE, como a fração sólida rica em fósforo para produção de fertilizantes, ocorre uma atenuação de até 98

toneladas anualmente na carga de resíduos destinados aos aterros sanitários. E a fração líquida reutilizada para irrigação, pode reduzir o aporte de até 24 toneladas de fósforo por ano nos corpos hídricos receptores.

Isso representa uma estratégia efetiva para gerenciar de maneira sustentável os nutrientes recuperados das ETE, fortalecendo a transição para uma gestão circular e consciente dos recursos. Desta maneira, recomenda-se que futuros trabalhos realizem estudos de viabilidade econômica para implementação dessas alternativas de remoção e reutilização do fósforo nas ETE de Florianópolis. Mantendo o monitoramento da qualidade dos efluentes tratados garantindo a conformidade com as diretrizes de segurança estabelecidas pela Organização Mundial de Saúde ao considerar fatores sobre os riscos à saúde.

## 6 REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Águas (Brasil). **Atlas esgotos : depoluição de bacias hidrográficas** / Agência Nacional de Águas, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. -- Brasília: ANA, 2017.

ANTERO, Gabriel Vidal Carvalho. **AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO OPERACIONAL E POTENCIAL DE RECUPERAÇÃO DE FÓSFORO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO BRASÍLIA SUL (DF)**. 2020. 1 v. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2020.

ARENHART, Bruna. **AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE REMOÇÃO DE FÓSFORO DE EFLUENTES A PARTIR DA UTILIZAÇÃO DE LODO DE ETA RICO EM ALUMÍNIO COMO ADSORVENTE**. 2019. 64 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

BARTON, Melissa A.; SIMHA, Prithvi; MAGRI, Maria Elisa; DUTTA, Shanta; KABIR, Humayun; SELVAKUMAR, Albert; ZHOU, Xiaoqin; LV, Yaping; MARTIN, Tristan; KIZOS, Thanasis. Attitudes of food consumers at universities towards recycling human urine as crop fertiliser: a multinational survey dataset. Data In Brief, [S.L.], v. 35, p. 106794, abr. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.dib.2021.106794>.

BASTOS, Rafael Kopschitz Xavier. **Desinfecção de Efluentes Sanitários, remoção de organismos patogênicos e substâncias nocivas, aplicações para fins produtivos, como agricultura, aquicultura e hidroponia**. Viçosa: PROSAB, 2003.

BERNARDO, Jéssica Aurora. **ESTUDO DE INTENSIDADE, DURAÇÃO E FREQUÊNCIA USANDO SENSORIAMENTO REMOTO E DADOS DE SUPERFÍCIE EM FLORIANÓPOLIS/SC**. 2023. 105 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de

Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2023.

BRASIL. (2005). **Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos e cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Diário Oficial da União, Brasília, DF.

CABRAL, Lucas Lacerda. **ADSORÇÃO E DESSORÇÃO DE FÓSFORO EM SOLUÇÃO AQUOSA, EM CERÂMICA VERMELHA SEM E COM PRÉ-ACTIVAÇÃO QUÍMICA E TERMOQUÍMICA**. 2019. 114 f. Monografia (Especialização) - Curso de Química, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

CECATO, Leonardo Dalri. **AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE RECICLO AGRÍCOLA DE ESGOTO TRATADO NO ESTADO DE SANTA CATARINA**. 2023. 149 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2023.

CHRISPIM, Mariana Cardoso. **Tecnologias permitem reciclagem de fósforo a partir do esgoto**. 2019. 1 v. Tese (Doutorado) - Curso de Saneamento Ambiental, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

COELHO, José Carlos. **MACRÓFITAS AQUÁTICAS FLUTUANTES NA REMOÇÃO DE ELEMENTOS QUÍMICOS DE ÁGUA RESIDUÁRIA**. 2017. 1 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Agronomia (Irrigação e Drenagem), Faculdade de Ciências Agrônômicas da Unesp, Botucatu, 2017.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (Brasil). **Resolução nº 357** de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil. Brasília, DF. 2005.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (Brasil). **Resolução Nº 430** de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil. Brasília, DF. 2011.

CYDZIK-KWIATKOWSKA, A; NOSEK, D. **Biological release of phosphorus is more efficient from activated than from aerobic granular sludge**. Sci Rep 10, 11076 (2020).

DALL'AGNOL, Patricia; LIBARDI, Nelson; MULLER, José Miguel; XAVIER, Jéssica Antunes; DOMINGOS, Dayane Gonzaga; COSTA, Rejane Helena Ribeiro da. A comparative study of phosphorus removal using biopolymer from aerobic granular sludge: a factorial experimental evaluation. **Journal Of Environmental Chemical Engineering**, [S.L.], v. 8, n. 2, p. 103541, abr. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2019.103541>.

Dall'Agnol, Patricia & Libardi, Nelson & Silva, Eduarda & Costa, Rejane. (2022). **Biosorption of Phosphorus Using Alginate-Like Exopolymers: Investigation of Removal**

**Mechanism, Kinetic and Thermodynamic Properties.** Journal of Polymers and the Environment. 30. 1-12. 10.1007/s10924-021-02232-0.

DALL'AGNOL, Patrícia; LADNORG, Sebastian; MAGNUS, Bruna Scandolaro; LIBARDI JUNIOR, Nelson; COSTA, Rejane Helena Ribeiro da. **Uso de esferas de alginato e de biopolímeros extraídos de lodo granular como material adsorvente na remoção de fósforo biopolímeros extraídos de lodo granular como material adsorvente na remoção de fósforo.** Revista Dae, [S.L.], v. 68, n. 226, p. 60-74, 18 set. 2020. Revista DAE. <http://dx.doi.org/10.36659/dae.2020.067>.

EPA, United States Environmental Protection Agency. **The Effects: Dead Zones and Harmful Algal Blooms.** 2023. Disponível em: <https://www.epa.gov/nutrientpollution/effects-dead-zones-and-harmful-algal-blooms>. Acesso em: 12 dez. 2023.

FANGMEIER, Michele; GENNARI, Adriano; REISDÖRFER, Gustavo. **TRATAMENTO DE FÓSFORO EM EFLUENTE FINAL COM USO DE FILTRO DE CARVÃO ATIVADO, AREIA E BRITA.** Revista Destaques Acadêmicos, Lajeado, v. 7, n. 4, p. 102-108, jul. 2015.

FREITAS, Paloma Caetano; AMORIM JÚNIOR, Joãozito Cabral. **AValiação da Eficiência na Remoção de Fósforo da Estação de Tratamento de Esgoto Doméstico por Processos de Precipitação Química.** Revista Espaço Acadêmico, Capixaba da Serra, v. 05, n. 1, p. 06-16, jul. 2018.

FUNASA. Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde. **Manual de Saneamento.** 4. ed. Brasília, 2015. 642 p.

GARSS, Carlos Fabiano Alteneta. **ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA PARA ATENDIMENTO DO PARÂMETRO FÓSFORO NA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO SÃO JOÃO - NAVEGANTES - DMAE.** 2019. 53 f. Monografia (Especialização) - Curso de Química Industrial, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

GUERRA, Ana Alice Andrade Meireles. **REMOÇÃO DE FÓSFORO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS UTILIZANDO NANOADSORVENTES CORE-SHELL BIMAGNÉTICOS.** 2020. 101 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 2020.

IERVOLINO, Luiz Fernando. **Wetlands (Jardins Filtrantes) para Tratamento de Esgotos.** 2019. Disponível em: <https://tratamentodeagua.com.br/artigo/sistema-wetland/>. Acesso em: 15 nov. 2023.

Kleinman, Peter & Sharpley, Andrew & McDowell, Rich & Flaten, Don & Buda, Anthony & Tao, Liang & Bergstrom, Lars & Zhu, Qing. (2011). **Managing Agricultural Phosphorus for Water Quality Protection: Principles for Progress.** Plant and Soil. 349. 169-182. 10.1007/s11104-011-0832-9.

KREUTZBERGER, Bill. **ELABORAÇÃO DE PROPOSTA DO PLANO DE AÇÃO PARA INSTITUIR UMA POLÍTICA DE REÚSO DE EFLUENTE SANITÁRIO**

**TRATADO NO BRASIL PRODUTO III – CRITÉRIOS DE QUALIDADE DE ÁGUA.**  
Brasil: Interáguas, 2017.

LEAL, Katiane Pierre. **AVALIAÇÃO DA IDADE DO LODO E DA RELAÇÃO C/P NA BIODESFOSFATAÇÃO DE ESGOTO SANITÁRIO EM REATOR EM BATELADAS SEQUENCIAIS EM ESCALA REAL.** 2017. 141 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.100>.

LEHTORANTA, Suvi et al. **Circular Economy in Wastewater Management—The Potential of Source-Separating Sanitation in Rural and Peri-Urban Areas of Northern Finland and Sweden.** *Frontiers In Environmental Science*, [S.L.], v. 10, n. 1, p. 1-50, 23 fev. 2022. Frontiers Media SA. <http://dx.doi.org/10.3389/fenvs.2022.804718>.

LEITE, Camille Nunes. **Recuperação de fósforo em estação de tratamento de esgoto através da coagulação-floculação e adsorção.** 2022. 95 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências, Solos e Nutrição de Plantas, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2022.

MARCHAND, Blanca Isabel Villafranca. **REMOÇÃO QUÍMICA E BIOLÓGICA DE FÓSFORO DE ESGOTO SANITÁRIO EM REATOR EM BATELADAS SEQUENCIAIS.** 2014. 136 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

MARIN, Renata Maria. **AVALIAÇÃO DA REMOÇÃO DE FÓSFORO ATRAVÉS DA DISPOSIÇÃO DE EFLUENTE DOMÉSTICO TRATADO NO SOLO.** 2021. 83 f. Monografia (Doutorado) - Curso de Engenharia Hídrica, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2021.

MARONEZE, Mariana Manzoni; ZEPKA, Leila Queiroz; VIEIRA, Juliana Guerra; QUEIROZ, Maria Isabel; JACOB-LOPES, Eduardo. **Phosphorus removal technology: Management of the element in industrial waste.** *Revista Ambiente & Água*, Taubaté, v. 9, n. 3, p. 1-14, ago. 2014.

METCALF & EDDY. **Tratamento de Efluentes e Recuperação de Recursos.** 5. ed. New York: Amgh Editora Ltda, 2016.

MOCELIN, Chaiane Mara. **POTENCIAL EMPREGO DE MACRÓFITAS NA REMOÇÃO DE NITROGÊNIO E FÓSFORO EM ÁGUAS RESIDUÁRIAS NO RIO GRANDE DO SUL.** 2021. 51 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal da Fronteira Sul, Erechim, 2021.

MOHEDANO, Rodrigo de Almeida. **Tratamento de efluente e produção de alimento, em cultivos de tilápias (*Oreochromis niloticus*), através da macrófita aquática *Lemna valdiviana* (lemnaceae).** - *Uma contribuição para a sustentabilidade da Aquicultura.* 2004. 44 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós Graduação em Aquicultura, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

MOHEDANO, Rodrigo A.; COSTA, Rejane H.R.; TAVARES, Flávia A.; BELLI FILHO, Paulo. High nutrient removal rate from swine wastes and protein biomass production by full-scale duckweed ponds. **Bioresource Technology**, [S.L.], v. 112, p. 98-104, maio 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2012.02.083>.

MOTA, Francisco Suetônio Bastos; VON SPERLING, Marcos. **Nutrientes de esgoto sanitário: utilização e remoção**. 2. ed. Fortaleza: Prosab, 2009. 428 p.

MOURA, Priscila Gonçalves; ARANHA, Felipe Nicolau; HANDAM, Natasha Berendonk; MARTIN, Luis Eduardo; SALLES, Maria José; CARVAJAL, Elvira; JARDIM, Rodrigo; SOTERO-MARTINS, Adriana. **Água de reúso: uma alternativa sustentável para o Brasil**. Engenharia Sanitaria e Ambiental, Rio de Janeiro, v. 25, n. 6, p. 791-808, dez. 2020. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-4152202020180201>.

Ó, Kely Dayane Silva do. **TRATAMENTO BIOLÓGICO DE ESGOTO E SOLUBILIZAÇÃO DE LODO COMO ALTERNATIVA DE RECUPERAÇÃO DE SUBPRODUTOS: MATERIAL CARBONÁCEO E NUTRIENTES**. 2021. 144 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Ambiental., Ciência e Tecnologia Ambiental, Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2021.

OGUNLAJA, O.O.; PARKER, W.J.. Assessment of the removal of estrogenicity in biological nutrient removal wastewater treatment processes. **Science Of The Total Environment**, [S.L.], v. 514, p. 202-210, maio 2015. Elsevier BV.

PASQUALINI, Joana Postal. **ADSORÇÃO DE FÓSFORO POR ÓXIDO-HIDRÓXIDO DE FERRO PRODUZIDO A PARTIR DE LIXIVIADO DA PIRITA DA MINERAÇÃO DE CARVÃO**. 2020. 100 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

PEREIRA, Juliana Teófilo dos Santos. **ESTUDO DA EFICIÊNCIA DE LODOS ATIVADOS NO TRATAMENTO DE EFLUENTES DE UMA INDÚSTRIA DE BEBIDAS**. 2019. 58 f. Monografia - Curso de Química Industrial, Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2019.

PINTO, José Maria; BASSOI, Luís Henrique; SOARES, José Monteiro. **Fertirrigação**. 2022. Embrapa. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/manga/producao/irrigacao/fertirrigacao>. Acesso em: 05 nov. 2023.

POLIGNANO, Marcus Vinicius. **Considerações Técnicas**. Belo Horizonte: Conama, 2014.

Projeto Ecoando Sustentabilidade. **Os primeiros 15 dias após o Rompimento da Barragem da LEI-CASAN**. Florianópolis: Serviço Público Federal Ministério da Educação, 2021.

QUEVEDO, Claudia Maria Gomes de e PIVELI, Roque Passos e PAGANINI, Wanderley da Silva. **A contribuição das frações de fósforo nos esgotos sanitários**. 2017, Anais.. São Paulo: ABES, 2017. Disponível em: [http://www.evolvedoc.com.br/aesabesp/detalhes-2643\\_a-contribuicao-das-fracoes-de-fosforo-nos-esgotos-sanitarios](http://www.evolvedoc.com.br/aesabesp/detalhes-2643_a-contribuicao-das-fracoes-de-fosforo-nos-esgotos-sanitarios). Acesso em: 02 set.2023.

SANEPAR. **USO E MANEJO DO LODO DE ESGOTO NA AGRICULTURA**. Curitiba: Prosab, 1999.

SANTA CATARINA. (2021). **Resolução CONSEMA nº 181, de 02 de agosto de 2021**. Estabelece os critérios e padrões de lançamento de efluentes líquidos em corpos hídricos de domínio do Estado de Santa Catarina e dá outras providências. Diário Oficial do Estado de Santa Catarina, Florianópolis, SC.

SANTOS, Manoela Paiva de Amorim. **EFICIÊNCIA NA RECUPERAÇÃO DE FÓSFORO DA URINA HUMANA PELA PRECIPITAÇÃO DA ESTRUVITA**. 2019. 59 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

SANTOS, Thalita Lacerda dos. **BIORREMEDIAÇÃO DE NITROGÊNIO, FÓSFORO E METAIS POR COMUNIDADE NATIVA DE MICROALGAS E BACTÉRIAS EM EFLUENTE TRATADO ANAEROBIAMENTE**. 2022. 149 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Bauru, 2022.

SASABUCHI, Isabela; KRIEGER, Kamille; NUNES, Renan; FERREIRA, Amanda; XAVIER, Gabriela; URZEDO, Alessandro; CARVALHO, Wagner; FADINI, Pedro. **SUSTENTABILIDADE NO USO DE FÓSFORO: uma revisão bibliográfica com foco na situação atual do estado de são paulo, Brasil**. Química Nova, São Paulo, v. 46, n. 2, p. 185-198, dez. 2022. Sociedade Brasileira de Química (SBQ). <http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20170967>.

SILVA, Aichely Rodrigues da; FONSECA, Alessandra Larissa; RODRIGUES, Claudinei. **APLICAÇÃO DE PROTOCOLO DE AVALIAÇÃO RÁPIDA E CONCENTRAÇÃO DO FÓSFORO INORGÂNICO DISSOLVIDO COMO FERRAMENTA PARA A ANÁLISE DA QUALIDADE AMBIENTAL DO RIO PAPAQUARA, ILHA DE SANTA CATARINA (SC, BRASIL)**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEÓGRAFOS, 7., 2014, Vitória. Anais [...]. Vitória: Associação dos Geógrafos Brasileiros, 2014. v. 1, p. 1-11.

SILVA, Kaylanne Montenegro da. **Estudo da geoquímica do Fósforo em sedimentos da Laguna de Araruama – RJ, para avaliação do processo de eutrofização**. 2019. 105 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Ciências, Subárea de Concentração: Gestão e Saneamento Ambiental, Escola Nacional de Saúde Pública Sérgio Arouca, na Fundação Oswaldo Cruz, Rio de Janeiro, 2019.

SOROKA, Vinícius Duarte; MARTINS Antônio Carlos; JÚNIOR, José Carlos Alves Barroso; SILVA, Maria Cristina de Almeida. **Estudos ambientais e agrônômicos: resultados para o Brasil** : vol. 5. São Luis: Pascal, 2021. Cap. 8, p. 104-115.

SOUSA, Matheus Urtiga. **Análise Físico-Química e Microbiológica de esgoto de uma universidade pública com proposta de tratamento biológico para reuso na própria instituição**. In: CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISAR E CIÊNCIAS DO ENSINO, 1., 2019, Paraíba. Anais [...]. Paraíba: Realize, 2019. p. 2-11.

SOUSA, Matheus Urtiga. **ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICA E MICROBIOLÓGICA DO ESGOTO DE UMA UNIVERSIDADE PÚBLICA COM PROPOSTA DE TRATAMENTO BIOLÓGICO PARA REUSO NA PRÓPRIA INSTITUIÇÃO.** In: **CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISAR E CIÊNCIAS DO ENSINO**, 1., Paraíba, 2016.

SOUZA, Julia Coelho de. **O potencial social das cestas de alimentos agroecológicos: dinâmicas organizativas em circuitos curtos de comercialização na Região da Grande Florianópolis.** 2023. 190 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar em Ciências Humanas, Universidade Federal de Santa Catarina, 2023.

TSENG, Cheng-Jui; CHETTHAMRONGCHAI, Paitoon; MAHMUDIONO, Trias; SHARMA, Satish Kumar; AL-AWSI, Ghaidaa Raheem Lateef; ABED, Salwan Ali; MOHAMMED, Faraj; OPULENCIA, Maria Jade Catalan; RUDIANSYAH, Mohammad. **Sustainability assessment of food industry with the approach of water, energy and food nexus.** Food Science And Technology, [S.L.], v. 42, n. 1, p. 01-07, 2022. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/fst.37922>.

VAZ, Sofia; BADENES, Sara; PINHEIRO, Helena; MARTINS, Rui. **Recent reports on domestic wastewater treatment using microalgae cultivation: Towards a circular economy.** 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103107>. Acesso em: 07 set. 2023.

WITEK-KROWIAK, Anna; GORAZDA, Katarzyna; SZOPA, Daniel; TRZASKA, Krzysztof; MOUSTAKAS, Konstantinos; CHOJNACKA, Katarzyna. **Phosphorus recovery from wastewater and bio-based waste: an overview.** Bioengineered, [S.L.], v. 13, n. 5, p. 13474-13506, 2 maio 2022. <http://dx.doi.org/10.1080/21655979.2022.2077894>.

## APÊNDICE A

Tabela 1 - Dados extraídos do Atlas Esgotos 2019 e cálculos realizados.

ETE	Nome	Tecnologia Associadas	Modalidade Específicas	Eficiência do Sistema	Vazão Afluente		Vazão Efluente	Eficiência Remoção Fósforo	Concentração média do Afluente
				%	L/s	m³/d	L/s	%	mg/L
1	Jurerê Internacional	Lodos Ativados	Lodos Ativados por Batelada + Disposição no Solo	90	24,10	2082,24	24,10	70	7,00
2	Vila União	Lodos Ativados	Lodos Ativados Convencional	85	1,00	86,40	1,00	75	7,00
3	Praia Brava	Lodos Ativados	Lodos Ativados + Lagoa Aerada + Lagoa Facultativa + Lagoa de Maturação	95	15,00	1296,00	15,00	80	7,00
4	Canasvieiras	Lodos Ativados	Filtro Biológico + Digestor Anaeróbico	90	156,00	13478,40	156,00	85	7,00
5	Saco Grande	Lodos Ativados	Lodos Ativados de Aeração Prolongada	87	5,50	475,20	5,50	80	7,00
6	PARQTEC	Lodos Ativados	Lodos Ativados em Batelada - SBR Sequencing Batch Reactor/ICEAS Aeração Prolongada c/Ciclos Intermitentes	90	2,90	250,56	2,90	85	7,00
7	Insular	Lodos Ativados	Lodos Ativados de Aeração Prolongada	96	272,00	23500,80	272,00	80	7,00
8	Barra da Lagoa	Lodos Ativados	Reator Anaeróbico + Lodos Ativados	96	37,00	3196,80	37,00	75	7,00
9	Lagoa da Conceição	Lodos Ativados	Reator Anaeróbico + Lodos Ativados (Valo de Oxidação)	96	35,00	3024,00	35,00	75	7,00
10	Base Aérea	Sistemas de Lagoas	Lagoa Facultativa	75	4,60	397,44	4,60	50	7,00
TOTAL						<b>47.787,84</b>			

## APÊNDICE B

Tabela 2 - Dados extraídos do Atlas Esgotos 2019 e cálculos realizados.

Nome	Concentração média do Efluente	Concentração média da Fração Sólida	Carga Bruta de Fósforo		Carga de Fósforo Fração Líquida		Carga de Fósforo Fração Sólida	
	mg/L	mg/L	g/s	kg/d	g/s	kg/d	g/s	kg/d
Jurerê Internacional	2,10	4,90	0,17	14,58	0,05	4,37	0,12	10,20
Vila União	1,75	5,25	0,01	0,60	0,00	0,15	0,01	0,45
Praia Brava	1,40	5,60	0,11	9,07	0,02	1,81	0,08	7,26
Canasvieiras	4,90	5,95	1,09	94,35	0,16	14,15	0,93	80,20
Saco Grande	1,40	5,60	0,04	3,33	0,01	0,67	0,03	2,66
PARQTEC	1,05	5,95	0,02	1,75	0,00	0,26	0,02	1,49
Insular	1,40	5,60	1,90	164,51	0,38	32,90	1,52	131,60
Barra da Lagoa	1,75	5,25	0,26	22,38	0,06	5,59	0,19	16,78
Lagoa da Conceição	1,75	5,25	0,25	21,17	0,06	5,29	0,18	15,88
Base Aérea	3,50	3,50	0,03	2,78	0,02	1,39	0,02	1,39
<b>TOTAL</b>				<b>334,51</b>		<b>66,60</b>		<b>267,92</b>