

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CAMPUS LAGOA DO SINO
CENTRO DE CIÊNCIAS DA NATUREZA

REBECA GILVÂNIA SILVA RODRIGUES

**FITORREMEDIÇÃO EM LAGOA FACULTATIVA DE
TRATAMENTO DE EFLUENTE DE QUEIJARIA: UM
ESTUDO DE CASO UTILIZANDO MACRÓFITAS
AQUÁTICAS**

BURI - SP
2025

REBECA GILVÂNIA SILVA RODRIGUES

**FITORREMEDIÇÃO EM LAGOA FACULTATIVA DE TRATAMENTO DE EFLUENTE
DE QUEIJARIA: UM ESTUDO DE CASO UTILIZANDO MACRÓFITAS AQUÁTICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Ambiental do Centro de Ciências da Natureza da Universidade Federal de São Carlos, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof^a. Dr^a. Beatriz Cruz Gonzalez
Coorientador: Prof. Dr^a. Roberta Barros
Lovaglio

BURI - SP
2025

Rodrigues, Rebeca Gilvânia Silva

Fitorremediação em lagoa facultativa de tratamento de efluente de queijaria: um estudo de caso utilizando macrófitas aquáticas / Rebeca Gilvânia Silva Rodrigues -- 2025.
57f.

TCC (Graduação) - Universidade Federal de São Carlos, campus Lagoa do Sino, Buri

Orientador (a): Beatriz Cruz Gonzalez

Banca Examinadora: Daniel Baron, Danilo Santiago
Gomes Lucio

Bibliografia

1. Tratamento de efluentes, Lagoa Facultativa, Fitorremediação. I. Rodrigues, Rebeca Gilvânia Silva. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática (SIn)


DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Lissandra Pinhatelli de Britto - CRB/8 7539


UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS DA NATUREZA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

Folha de Aprovação


Assinatura dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Trabalho de Conclusão de Curso da candidata Rebeca Gilvânia Silva Rodrigues, realizada em 17/11/2025:

 Documento assinado digitalmente
BEATRIZ CRUZ GONZALEZ
Data: 05/12/2025 16:57:51-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profª Drª Beatriz Cruz Gonzalez – Orientadora
Centro de Ciências da Natureza – UFSCar – Campus Lagoa do Sino.

 Documento assinado digitalmente
DANIEL BARON
Data: 19/11/2025 20:01:54-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Daniel Baron
Centro de Ciências da Natureza – UFSCar – Campus Lagoa do Sino.

 Documento assinado digitalmente
DANILO SANTIAGO GOMES LUCIO
Data: 17/11/2025 22:32:17-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Danilo Santiago Gomes Lucio
Departamento de Hidráulica e Saneamento – USP (EESC – SHS)

DEDICATÓRIA

À minha mãe e ao meu pai que, mesmo em meio às turbulências, me guiaram para que eu pudesse
sonhar e seguir com tranquilidade.

AGRADECIMENTO

A Deus que, nos momentos em que me senti sem chão, atendeu às minhas orações. Ele me mostrou a luz em meio à escuridão, fortalecendo minha fé e minha esperança por meio de toda a beleza que vi e por todos os corações que cruzei durante essa jornada, se tornaram abrigo.

À minha mãe, Márcia, minha estrela guia, meu maior exemplo de persistência. Obrigada por ser meu alicerce, por me mostrar que eu era capaz de conquistar meus objetivos e por não medir esforços para que eu pudesse ter o de melhor. Em todos os momentos que duvidei de mim e não encontrei solução, seu amor e conselhos foram a base para me erguer e trilhar o melhor caminho até aqui.

Ao meu pai, Inácio, meu exemplo de força e humildade. Por todas as vezes que mesmo após um dia exaustivo no serviço, deixou o cansaço de lado e foi, sem hesitação, o maior apoiador e incentivador, direcionando-me a ter a coragem necessária para não desistir.

Aos meus irmãos, Raquel, Carlos Eduardo e Anthony, meu coração fora do peito. Em incontáveis noites, a saudade pesou, e as despedidas de domingo trouxeram dor. Mas, acima de tudo, vocês demonstraram a mais profunda compreensão e compaixão pela ausência em momentos especiais e na falta de um abraço de boa noite. Saibam que vocês foram e são, sem dúvidas, a minha maior motivação.

Aos meus avós, Maria e João, e à minha tia, Mônica, por incentivar e aconselhar, desde o momento em que souberam da minha aprovação na faculdade.

A todos àqueles que estão comigo desde o início da faculdade, em especial a Isabelle Rodrigues, Larissa Martins, Maria Sabrina, Suellen Albuquerque e Julia Rinaldi, com vocês, foi possível dividir a carga e deixar esse percurso mais leve, divertido, cheio de apoio e bons momentos. Ao meu namorado, André, um verdadeiro companheiro de aprendizado, foram inúmeras noites ouvindo meus anseios, projetos e histórias, agradeço por toda a parceria e compreensão durante esses anos.

Ao Centro de Extensão e Pesquisa em Águas e Efluentes (CEPAE), por ter proporcionado um ambiente que enriqueceu meu conhecimento e impulsionou meu crescimento. Nesse espaço, pude explorar meu profissional e pessoal, ampliando minha visão para uma engenharia mais acessível e equitativa.

À empresa Savencia Brasil e à engenheira ambiental, Patrícia Ferreira, em disponibilizar não só as ferramentas, o espaço e os dados necessários, como também, concretizar a idealização desse trabalho.

À minha orientadora, à professora Beatriz Cruz Gonzalez, sou imensamente grata pela paciência, orientação, incentivo e confiança para este trabalho. Poder contar com todos os ensinamentos e conselhos oferecidos foram fundamentais para que eu pudesse concluir esse ciclo tão importante. Também agradeço à coorientadora professora Roberta Lovaglio por toda contribuição e orientação.

RESUMO

RODRIGUES, R. G. S. **Fitorremediação em lagoa facultativa de tratamento de efluente de queijaria: um estudo de caso utilizando macrófitas aquáticas.** Trabalho de Conclusão de Curso - Bacharelado em Engenharia Ambiental. Universidade Federal de São Carlos. Campus Lagoa do Sino. Buri, SP. 2025. 57p.

O lançamento de efluentes sem o tratamento apropriado é uma das principais causas de poluição dos corpos d'água, o que ocasiona uma série de problemas ambientais e que exige soluções que unam conformidade ambiental e a viabilidade operacional. Nesse contexto, a biorremediação destaca-se como alternativa para otimizar a eficiência das lagoas de estabilização no setor de laticínios, visando um tratamento mais sustentável, de baixo custo e com elevada capacidade de remoção de poluentes. O presente estudo avaliou a eficiência da fitorremediação com macrófitas aquáticas em uma lagoa facultativa utilizada no tratamento de efluentes de uma indústria de queijos processados, localizada na unidade Savencia Brasil, em Angatuba/SP. O estudo buscou verificar a viabilidade técnica e ambiental da aplicação das espécies *Pontederia crassipes* Mart., *Canna x generalis* e *Cyperus alternifolius* L. na melhoria da qualidade do efluente e na remoção da carga orgânica. O monitoramento físico-químico e estatístico dos parâmetros pH, oxigênio dissolvido (OD), demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e demanda química de oxigênio (DQO) demonstrou que o sistema apresentou desempenho satisfatório, com eficiência média de remoção de DBO de 89,5% e de DQO superior a 80%, mantendo o pH dentro das faixas legais. O desenvolvimento do sistema radicular e a elevada capacidade de colonização das macrófitas favoreceram a retenção de sólidos e o estímulo à atividade microbiana, ampliando a melhoria da qualidade do efluente. As variações sazonais e eventuais interferências operacionais, como rompimentos das áreas de delimitação e períodos de replantação das espécies, influenciaram momentaneamente o desempenho, mas não comprometeram a estabilidade do tratamento. Os resultados obtidos demonstraram o potencial da fitorremediação como modelo de tratamento biológico para efluentes industriais de laticínios. Essa tecnologia, uma alternativa eficiente, de baixo custo e ambientalmente sustentável, contribuindo para a conformidade do efluente com a legislação vigente e promovendo benefícios ecológicos locais.

Palavras-chave: efluente de laticínios; fitorremediação; lagoa facultativa; macrófitas aquáticas; queijaria; tratamento biológico.

ABSTRACT

RODRIGUES, R. G. S. **Phytoremediation in a Facultative Pond for Dairy Effluent Treatment: A Case Study Using Aquatic Macrophytes**. Undergraduate Thesis - Bachelor's Degree in Environmental Engineering. Federal University of São Carlos. Lagoa do Sino Campus. Buri, SP. 2025. 57p.

The discharge of effluents without proper treatment is one of the main causes of pollution in water bodies, leading to a series of environmental problems that demand solutions combining environmental compliance and operational viability. In this context, bioremediation stands out as an alternative to optimize the efficiency of stabilization ponds in the dairy sector, aiming for a more sustainable, low-cost treatment with high pollutant removal capacity. This study evaluated the efficiency of phytoremediation using aquatic macrophytes in a facultative lagoon employed for the treatment of effluents from a processed dairy industry, located at the Savencia Brasil unit in Angatuba, São Paulo. The research aimed to verify the technical and environmental feasibility of applying the species *Pontederia crassipes* Mart., *Canna x generalis*, and *Cyperus alternifolius* L. to improve effluent quality and reduce organic load. The physicochemical and statistical monitoring of parameters such as pH, dissolved oxygen (DO), biochemical oxygen demand (BOD), and chemical oxygen demand (COD) demonstrated that the system performed satisfactorily, achieving an average BOD removal efficiency of 89.5% and COD removal above 80%, while maintaining pH levels within legal limits. The plant development of the root system and the high colonization capacity of the macrophytes favored the retention of suspended solids and stimulated microbial activity, enhancing effluent quality improvement. Seasonal variations and occasional operational interferences, such as breakage of containment areas and replanting periods, temporarily influenced performance but did not compromise treatment stability. The results demonstrated the potential of phytoremediation as a biological treatment model for dairy industry effluents. This technology represents an efficient, low-cost, and environmentally sustainable alternative, contributing to effluent compliance with current legislation and promoting local ecological benefits.

Keyword: aquatic macrophytes; biological treatment; dairy factory; dairy effluent; facultative lagoon; phytoremediation.

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1 - Etapas genéricas do processo produtivo da indústria de laticínios.....	16
Figura 2 – Representação dos processos da fitorremediação.....	22
Figura 3 – Grupos de macrófitas aquáticas.....	24
Figura 4 - Mapa de localização da indústria Savencia Brasil, unidade de Angatuba - São Paulo.....	27
Figura 5 - Área piloto da fitorremediação na lagoa (1) e a perspectiva de expansão (2) e (3) em relação ao ponto de entrada do efluente bruto (PE) e ao ponto de saída do efluente tratado (PS).	29
Figura 6 - Delimitação da área para fitorremediação na lagoa facultativa de tratamento da indústria Savencia Brasil.....	30
Figura 7 – Coleta manual dos aguapés em um lago próximo a região e armazenadas com auxílio de bags (A), posteriormente a introdução na lagoa (B).....	31
Figura 8 - <i>Canna x generalis</i> inserida no leito da lagoa.....	32
Figura 9 – Espécies <i>Canna x generalis</i> e <i>Cyperus alternifolius</i> L. em suspensão na superfície da lagoa.	32
Figura 10 – Estrutura utilizada para inserir as espécies <i>Cyperus alternifolius</i> L. (A) e <i>Canna x generalis</i> (B) em suspensão na superfície da lagoa.....	33
Figura 11 – Observação das espécies <i>Pontederia crassipes</i> Mart (A), <i>Cyperus alternifolius</i> L. (B) e <i>Canna x generalis</i> (C-D), após o primeiro mês de implementação.	34
Figura 12 – Variação temporal do pH na lagoa facultativa durante o monitoramento da fitorremediação com as três espécies de macrófitas aquáticas em relação aos limites de lançamentos exigidos pela legislação vigente.	39
Figura 13 - Gráfico da distribuição geral dos valores de pH na entrada da lagoa facultativa antes do sistema de fitorremediação e na saída da lagoa após o sistema de fitorremediação (p -value = 0,04517).	40
Figura 14 -Variação temporal do OD na lagoa facultativa durante o monitoramento da fitorremediação com as três espécies de macrófitas aquáticas	42
Figura 15 – Gráfico da distribuição geral dos valores de OD na entrada da lagoa facultativa antes do sistema de fitorremediação e na saída da lagoa após o sistema de fitorremediação (p -value = 0,787)..	43
Figura 16 – Variação temporal da eficiência de remoção da DBO ₅ na lagoa facultativa durante o monitoramento da fitorremediação com as três espécies de macrófitas aquáticas.....	44
Figura 17 - Gráfico da distribuição geral dos valores de DBO na entrada da lagoa facultativa antes do sistema de fitorremediação e na saída da lagoa após o sistema de fitorremediação (p -value = 0,007882).	46
Figura 18 – Variação temporal da eficiência de remoção da DQO na lagoa facultativa durante o monitoramento da fitorremediação com as três espécies de macrófitas aquáticas.....	47
Figura 19 - Gráfico da distribuição geral dos valores de DQO na entrada da lagoa facultativa antes do sistema de fitorremediação e na saída da lagoa após o sistema de fitorremediação (p -value = 0,001144).	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Faixas de valores dos parâmetros físico-químicos típicos do efluente de laticínios.....	18
Tabela 2 - Principais tecnologias empregadas em cada nível de tratamento de efluentes de queijaria.	19
Tabela 3 - Padrões de lançamento de efluentes conforme a norma federal e estadual.....	26
Tabela 4 – Métodos utilizados pelo laboratório para análises dos parâmetros físico-químico ambientais presentes no efluentes líquidos da lagoa facultativa de tratamento da empresa.....	36
Tabela 5 - Valores do monitoramento pontual dos parâmetros fósforo total e nitrogênio amoniacal total na saída da lagoa facultativa.....	49

LISTA DE ABREVIATURAS

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente

DBO - Demanda Bioquímica de Oxigênio

DQO - Demanda Química de Oxigênio

OD - Oxigênio Dissolvido

pH - Potencial Hidrogeniônico

ETE - Estação de Tratamento de Efluentes

mg.L⁻¹ - Miligrama por Litro

ND – Não Detectado

SMWW - Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater

INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVOS	15
2.1. OBJETIVOS GERAIS	15
2.1.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
3.1. GERAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE EFLUENTE DE QUEIJARIA.....	15
3.2. TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO.....	18
3.3. LAGOA FACULTATIVA DE TRATAMENTO.....	20
3.4. FITORREMEDIAÇÃO.....	21
3.4.1. MACRÓFITAS AQUÁTICAS NA FITORREMEDIAÇÃO.....	23
3.5. LEGISLAÇÃO AMBIENTAL APLICADA AO TRATAMENTO DE EFLUENTE DE QUEIJARIA.....	26
4. MATERIAIS E MÉTODOS	27
4.1. ÁREA DE ESTUDO.....	27
4.2. LAGOA FACULTATIVA DE TRATAMENTO DE EFLUENTES DA INDÚSTRIA.....	28
4.3. DELIMITAÇÃO DAS ÁREAS DE FITORREMEDIAÇÃO.....	29
4.4. SELEÇÃO DAS ESPÉCIES DE MACRÓFITAS AQUÁTICAS.....	30
4.5. IMPLEMENTAÇÃO DAS MACROFITAS ÁQUATICAS NA LAGOA FACULTATIVA.....	31
4.6. MONITORAMENTO E CONTROLE.....	33
4.7. AMOSTRAGEM E MONITORAMENTO DOS DADOS.....	35
4.8. ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	37
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
5.1. ANÁLISE DOS PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS.....	38
5.1.1. POTENCIAL HIDROGENIÔNICO (pH).....	38
5.1.2. OXIGÊNIO DISSOLVIDO (OD).....	41
5.1.3. DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXIGÊNIO (DBO).....	44
5.1.4. DEMANDA QUÍMICA DE OXIGÊNIO (DQO).....	46
5.1.5. PARÂMETROS COM AMOSTRAGEM ESPARSA.....	48
5.2. CONFORMIDADE DO EFLUENTE TRATADO COM A LEGISLAÇÃO VIGENTE.....	50
5.3. LIMITAÇÕES OBSERVADAS NO ESTUDO.....	50
5.4. TRABALHOS FUTUROS.....	51
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	52
REFERÊNCIAS	53

1. INTRODUÇÃO

A indústria de laticínios desempenha um papel fundamental no setor agroindustrial, contribuindo significativamente para o desenvolvimento econômico e social de pequenas e grandes cidades. O Brasil é o terceiro maior produtor de laticínios do mundo e oferece uma diversificada gama de produtos nesse setor (ANDRADE; OLIVEIRA et.al, 2023). No entanto, devido à produção intensiva e ao alto consumo de água nos processos, são gerados grandes volumes de efluentes líquidos, o que torna o setor um dos principais agentes poluidores, em razão da elevada carga orgânica e volume gerado (SANTOS; SILVA; SANTOS, 2022).

Os efluentes líquidos gerados na produção da indústria de laticínios têm em sua composição elevados teores de matéria orgânica, gorduras, sólidos suspensos, nutrientes, graxas e óleos. Apresentando também, variações significativas no pH e altos níveis de nitrogênio e fósforo, principalmente devido ao uso de produtos de limpeza e desinfecção (CICHELO; RIBEIRO; TOMMASO, 2015). Essas particularidades do esgoto em questão, combinadas com seu alto potencial poluente, demandam o seu tratamento para que o mesmo possa ser lançado na rede pública de esgotos e em corpos hídricos (SOUZA et al, 2021).

O tratamento inadequado ou direcionamento direto aos corpos receptores geram a contaminação e desoxigenação dos canais hídricos e solo, afetando diretamente a fauna e flora local (COSTA, 2011). Dessa forma, a legislação ambiental brasileira estabelece normas rigorosas para o tratamento de efluentes industriais, incluindo-se os da indústria láctea, como a Resolução nº430/2011 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). No entanto, apesar da exigência e dos parâmetros a serem atingidos, ainda há uma falha na fiscalização dos órgãos responsáveis, o que contribuiu para o descarte dessas águas residuárias de forma não adequada e o impacto significativo ao meio ambiente (LEITE et al., 2018).

Os métodos de tratamento frequentemente mais utilizados para as águas residuárias geradas pela indústria de laticínios incluem práticas como o gradeamento, a sedimentação, a flotação, a precipitação química e a estabilização (SANTOS; SILVA; SANTOS, 2022). No que se refere aos métodos de tratamento intermediários ou finais, a aplicação de sistemas de tratamento baseados em lagoas facultativas é muito comum, em função dos seus baixos custos operacionais e da eficácia na remoção de contaminantes de forma natural, sem a necessidade de equipamentos mecânicos em grande escala. Contudo, as lagoas de estabilização convencionais apresentam algumas limitações, pois não costumam apresentar uma alta taxa de

remoção de nutrientes, e ainda há a possibilidade de odor e a proliferação de mosquitos e outros vetores de doenças, que, conforme a particularidade dos efluentes tratados, não atendem à legislação pertinente (VON SPERLING, 2002).

Diante desse cenário, o presente estudo baseia-se na investigação de melhorias no sistema de tratamento de efluentes da lagoa facultativa da indústria Savencia Brasil na unidade de Angatuba/SP. Tendo em vista que, a unidade é responsável por uma gama de produtos provenientes de queijos processados, como o queijo Polenginho[®], queijos especiais como *brie* e outros derivados lácteos, como requeijão cremoso e *cream cheese*. A vasta produção, resulta em uma expressiva geração de águas residuárias, estimada em 300m³ por dia e de impacto poluidor considerável (POLENGHI, 2024).

Conseqüentemente, a busca pela adequação às exigências ambientais e pela conformidade com a legislação pertinente, estimula uma demanda progressiva e necessária na adoção de práticas mais sustentáveis em diversas áreas da indústria, incluindo o setor estudado. Essa tendência é refletida mediante a necessidade crescente de preservação dos recursos naturais, o qual contribui para o avanço significativo de novas tecnologias e alternativas atreladas aos sistemas de tratamento, tornando-os cada vez mais sustentáveis, eficazes e econômicos (BORGES; ARAÚJO, 2023).

Dessa maneira, a indústria Savencia Brasil iniciou em abril de 2024 uma parceria com a Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), *campus* Lagoa do Sino (Bui/SP) para estruturação do projeto de pesquisa denominado como Gênesis. Essa iniciativa é dividida em cinco fases complementares e cada uma, direcionada a soluções específicas para otimizar o sistema de tratamento. As fases incluem: (1) construção de uma *wetland* e revitalização de caixas de gordura; (2) instalação de aeradores; (3) aplicação de fitorremediação com plantas aquáticas; (4) melhorias no deságue de lodo com bags filtrantes reutilizáveis; e (5) aplicação de meio filtrante nas caixas de comporta.

Nesse contexto, a pesquisa atual concentra-se especificamente na fase 3, o qual explora a expansão dessa metodologia para novas delimitações na lagoa, a fim de superar as limitações presentes no sistema e ampliar a sustentabilidade do processo. Uma vez que, a fitorremediação com macrófitas aquáticas emerge como uma abordagem inovadora e sustentável para o tratamento dessas águas residuárias. Tal método envolve a utilização estratégica de plantas aquáticas, para remover, degradar ou imobilizar poluentes presentes em ambientes aquáticos,

por meio de seus sistemas radiculares, o que contribui para a depuração da água, oferecendo uma alternativa e ecologicamente benéfica em comparação com métodos convencionais de tratamento (BRITO, 2021; BEZERRA, 2019).

Dessa forma, além da capacidade de remediar uma ampla gama de poluentes, a fitorremediação com macrófitas aquáticas se destaca por sua aplicabilidade em diferentes contextos, desde águas residuárias industriais até ecossistemas naturais de água doce, proporcionando que as características dos efluentes sigam dentro dos padrões de lançamento exigidos pelos órgãos ambientais, assegurando a proteção dos recursos hídricos locais.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVOS GERAIS

Investigar a viabilidade e eficiência da fitorremediação com macrófitas aquáticas em lagoa facultativa, nas condições específicas do efluente proveniente da indústria Savencia Brasil no município de Angatuba - SP.

2.1.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estabelecer duas delimitações de fitorremediação na zona de saída da lagoa facultativa e introduzir duas espécies distintas de macrófitas aquáticas em cada uma delas;
- Monitorar o crescimento das macrófitas por meio de registros fotográficos e medições mensais do seu comprimento;
- Avaliar sistematicamente o comportamento e a variação da qualidade do efluente, por meio do monitoramento dos seguintes parâmetros físico-químicos: demanda química de oxigênio (DQO); demanda bioquímica de oxigênio (DBO); pH; alcalinidade, oxigênio dissolvido; concentrações de nitrogênio na sua forma amoniacal, nitrito, nitrato e fósforo.

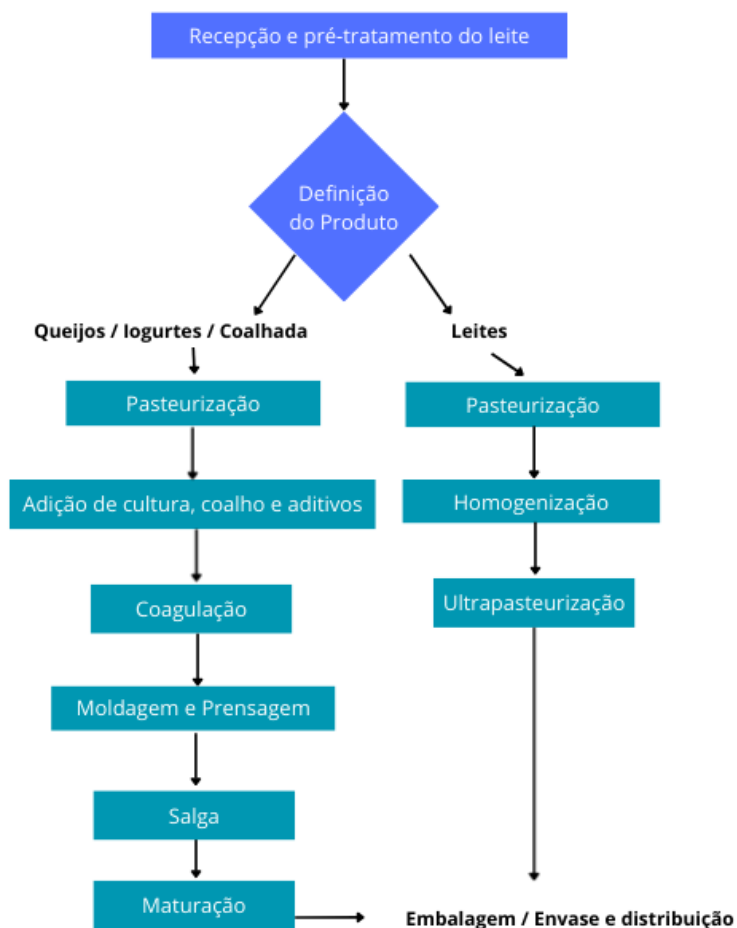
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. GERAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE EFLUENTE DE QUEIJARIA

O setor de laticínio engloba uma vasta operação e diversificação de produtos fabricados, e muitas dessas operações, comuns a todos os processos produtivos, como pode ser observado no fluxograma resumindo os processos (Figura 1), baseado nos trabalhos de

FIEMG, FEAM e SILEMG (2014), CETESB (2006), Costa (2011). Contudo, as produções de queijos processados e demais derivados demandam de tratamentos específicos e adicionais de transformação da matéria-prima láctea, como a trituração, mistura fusão e emulsão.

Figura 1 - Etapas genéricas do processo produtivo da indústria de laticínios.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Bortoli (2022) descreve que a produção de queijo processado e seus derivados, tem por etapa fundamental o derretimento da matéria-prima, que geralmente consiste em queijos naturais ou *in natura*. Para isso, ocorre a trituração de ingredientes, por diferentes tipos de queijos como o muçarela e cheddar, seguida pela mistura de proteínas lácteas, gorduras vegetais, sal fundente e, ocasionalmente, outros ingredientes como especiarias ou condimentos. Durante

a etapa de fusão, esses ingredientes são submetidos ao aquecimento, promovendo a incorporação homogênea dos componentes. E ainda de acordo com o autor, o processo de emulsão também é essencial, pois se utiliza de agentes emulsionantes para garantir textura uniforme e evitar separação de fases.

Nesse contexto, de acordo com a CETESB (2006) a geração de águas residuárias é o principal impacto ambiental nesse setor. A qualidade e quantidade desses efluentes é uma preocupação significativa, uma vez que, mesmo com as variações sazonais na linha de produção de queijos, o processo resulta em uma elevada geração de efluentes, o que gera de 1 a 6 litros de resíduos para cada litro de leite processado.

De acordo com Henares (2015), os efluentes gerados pela indústria de laticínios, possuem características físico-químicas provenientes tanto do processamento do queijo, seus derivados diluídos e materiais sólidos, quanto das operações de lavagens de equipamentos, tanques, tubulações, pisos, lubrificantes de máquinas, assim como, dos esgotos sanitários presentes nas unidades. Souza et al. (2021) relata que a presença desses materiais sólidos e outros componentes derivados do processamento do queijo, juntamente com a utilização de materiais como detergentes, desinfetantes, graxas e lubrificantes, influenciam diretamente para geração de um efluente com elevada carga de matéria orgânica, refletida nos altos valores de demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e demanda química de oxigênio (DQO), além de características físico-químicas variadas de acordo com os procedimentos de fabricação.

Autores como Traversi (2013), Cichello; Ribeiro; Tommaso, (2015) e Amoy (2023), relatam que a quantidade de nitrogênio (N) presente nos efluentes de laticínios, está diretamente ligada à proteína do leite, presente em todos os produtos e subprodutos, os valores de fósforo (P) e o pH são influenciados além da proteína do leite, por resíduo de soluções ácidas e alcalinas das operações de limpeza. E a turbidez, condicionada pela presença de sólidos suspensos e a cor da água, pelos sólidos dissolvidos.

Na Tabela 1, apresentam-se os parâmetros físico-químicos encontrados em efluentes de laticínios, comumente ao de queijarias, com as faixas de valores típicos, considerando as composições comuns resultantes do processamento e matéria-prima.

Tabela 1 - Faixas de valores dos parâmetros físico-químicos típicos do efluente de laticínios.

Parâmetro	Faixa de Variação (1)	Faixa de Variação (2)
Sólidos Suspensos Voláteis	24 – 5.700 mg.L ⁻¹	100 – 1.000 mg.L ⁻¹
Sólidos Suspensos Totais	135 – 8.500 mg.L ⁻¹	100 – 2.000 mg.L ⁻¹
DQO	500 – 4.500 mg.L ⁻¹	6.000 mg.L ⁻¹
DBO	450 – 4.790 mg.L ⁻¹	4.000 mg.L ⁻¹
pH	5,3 – 9,4	1 – 12
Temperatura	12 – 40 °C	20 – 30 °C
Proteína	210 – 560 mg.L ⁻¹	ND
Gorduras/Óleos e Graxas	35 – 500 mg. L ⁻¹	95 – 550 mg.L ⁻¹
Carboidratos	252 – 931 mg.L ⁻¹	ND
Amônia	10 – 100 mg.L ⁻¹	ND
Nitrogênio Total (N Total)	15 – 180 mg.L ⁻¹	116 mg.L ⁻¹
Fósforo Total (P)	20 – 250 mg.L ⁻¹	0,1 – 46 mg.L ⁻¹
Potássio Total (K)	11 – 160 mg.L ⁻¹	ND

Fonte: Adaptado com base na metodologia de classificação proposta pela CETESB - Guia Técnico Ambiental da Indústria de Produtos Lácteos – Série P+L (2006).

3.2.TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO

O lançamento de efluentes de queijaria em corpos hídricos pode desencadear uma série de impactos significativos no meio ambiente e à saúde humana, quando não tratado de forma prévia e adequada (SANTOS; SILVA; SANTOS, 2022). Conforme apontado por diversos autores, a elevada carga de matéria orgânica presente nesses efluentes promove a proliferação de microrganismos decompositores. Estes microrganismos consomem o oxigênio dissolvido durante o processo de estabilização da matéria orgânica, o que esgota o oxigênio disponível e provoca notáveis índices de mortalidade na biota aquática. Além disso, a presença de compostos químicos residuais promove o desbalanço de nutrientes, resultando-se na eutrofização do meio aquático e potenciais problemas a saúde humana (VON SPERLING, 1996; GONÇALVES, 2017; SOUZA et al., 2021; AMOY, 2023).

Nesse cenário, com base nos estudos de Santos, Silva e Santos (2022), o tratamento dos efluentes gerados pelo setor de laticínios é realizado de forma escalonada, estruturado conforme apresentado na Tabela 2 abaixo.

Tabela 2 - Principais tecnologias empregadas em cada nível de tratamento de efluentes de queijaria.

Etapa de Tratamento	Processos Utilizados	Objetivo Principal
Preliminar	Gradeamento e Caixa de areia	Remoção de sólidos grosseiros (embalagens, fragmentos, coágulos de leite)
Primário	Decantação, Filtros, Caixas de gordura, Coagulação/Floculação, Flotação (ar comprimido/dissolvido)	Remoção de sólidos em suspensão sedimentáveis e flutuantes
Secundário	Aeróbios: Lodos ativados, Filtros biológicos, Lagoas aeradas, Lagoas de facultativas Anaeróbios: Filtros anaeróbios, Reatores UASB	Degradação da matéria orgânica biodegradável

Fonte: Autoria própria, 2025.

No nível de tratamento preliminar, utiliza-se de processos físicos como gradeamento para remoção de sólidos grosseiros (protegendo equipamentos como bombas e tubulações) e as caixas de areia, que retêm substâncias inertes e sólidos minerais sedimentáveis, o que previne o desgaste nos equipamentos (SOUZA et al., 2021). No tratamento primário, pode-se empregar de caixas de retenção de óleos e gorduras para evitar obstruções na rede de esgoto e odores desagradáveis, seguido pela sedimentação em decantadores, onde os sólidos em suspensão se separam do efluente líquido e dão origem ao lodo (FIEMG; FEAM; SILEMG, 2014).

Já o tratamento secundário, de acordo com o Guia Técnico Ambiental de Indústrias de Laticínios (FIEMG; FEAM; SILEMG, 2014) é realizado por processos biológicos e propostos como última etapa do tratamento. Com o uso das tecnologias mais comuns de serem utilizadas as seguintes: i) lodos ativados, onde a remoção da matéria orgânica do meio líquido é realizada por microrganismos aeróbios; ii) reatores anaeróbios (UASB), o qual a matéria orgânica é biologicamente estabilizada de maneira que não demande oxigênio, sendo posteriormente

decomposta e gerando gás metano, iii) lagoas de estabilização, em que a remoção da matéria orgânica do meio líquido, ocorre em todas as zonas da lagoa, o qual é realizada por microrganismos aeróbios ou anaeróbios (HENARES, 2015).

Os autores Gonçalves (2017), Souza et al., (2021) e Santos, Silva e Santos (2022) ressaltam, ainda, que as composições características desse tipo de efluente para que se tenha a adequação dos parâmetros ambientais, podem ocasionar a escolha de um sistema de tratamento complexo e rigoroso. A metodologia convencional empregada nas estações de tratamento de efluentes (ETE) para o setor de laticínios, como indicado por Santos, Silva e Santos (2022), pode apresentar custos excessivos de implantação e desempenho regular na redução de DQO e DBO, bem como, na redução dos valores médios de pH e demais poluentes, quando não se atentam as necessidades.

3.3. LAGOA FACULTATIVA DE TRATAMENTO

As lagoas facultativas constituem-se em um sistema de tratamento de efluente que utiliza processos naturais para estabilização da matéria orgânica sem exigir equipamentos complexos, o que caracteriza sua simplicidade operacional (VON SPERLING, 2002).

Nemerow et al. (2009), descreve que a profundidade das lagoas facultativas varia de 1,0 a 3,0 metros, com uma relação de comprimento e largura usual de 2 a 4 metros, ocupando uma área relativamente grande. Segundo Von Sperling (1996), o tempo de detenção hidráulica pode variar de 15 e 45 dias, a depender de fatores ambientais como a radiação solar e temperatura. Esses fatores influenciam diretamente no volume necessário da lagoa, em vista que, em regiões mais quentes a atividade microbiana acelera, o que permite o tempo de detenção menor.

Von Sperling (1996) relata que essas unidades operam por meio do equilíbrio entre zonas aeróbios e anaeróbios, na qual a camada superior mantém condições oxigenadas devido a aeração natural e ação fotossintética das algas, enquanto a zona inferior opera de maneira aeróbia, onde a matéria orgânica é sedimentada e dá origem ao lodo, posteriormente decomposto por processos anaeróbios, resultando na produção de ácidos inorgânicos e gás como o metano (CH_4) e gás carbono (CO_2) e pode, ainda, gerar a formação de outros gases como ácidos graxos e H_2S , a depender das características do efluente recebido.

Segundo Nemerow et al. (2009), o mecanismo central de remoção de DBO ocorre conforme a interação de organismos aeróbios presentes na zona superior da lagoa e por organismos

aeróbios e facultativos, presentes na zona inferior da lagoa. Essa relação favorece uma remoção de DBO, frequentemente superior a 80%, além de promover uma sedimentação significativa dos sólidos suspensos, que ficam retidos no lodo para uma digestão anaeróbia.

Observou-se em estudo anterior que a remoção de DQO, ocorre de forma parcial principalmente por mecanismos indiretos como assimilação pela biomassa de algas e bactérias. Da mesma forma, essa remoção parcial ocorre com os nutrientes, como nitrogênio (N) e fósforo (P). No caso do nitrogênio (N), o autor refere-se que ocorre possivelmente pela volatilização da amônia (NH_3) em pH elevado, resultante da intensa atividade fotossintética. A remoção de fósforo (P) por sedimentação é geralmente baixa, visto que a maior parte do nutriente se encontra na forma solúvel, o qual não sofre sedimentação, sujeito a um ciclo interno de liberação e reassimilação entre a coluna d'água e os sedimentos presentes da lagoa (VON SPERLING, 1996).

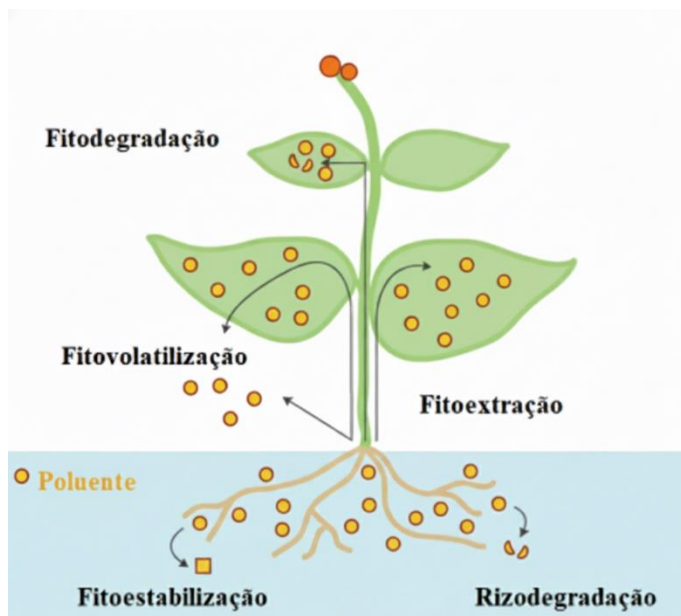
Nessas condições, a fim de atender as diretrizes regulamentárias de maneira satisfatória, com processos econômicos e com a constante redução da carga poluidora de forma mais sustentável, estima-se a integração de mais de uma tecnologia de tratamento para esse sistema.

3.4. FITORREMEDIAÇÃO

A fitorremediação é um método de biorremediação que surge como alternativa sustentável para os processos convencionais no tratamento de águas residuárias (BORGES; ARAÚJO, 2023). Por meio da utilização de plantas e microrganismos associados como as microalgas, fungos e bactérias, esse mecanismo contempla a degradação, extração, contenção ou imobilização de contaminação orgânica ou inorgânica, o que reduzir os teores de contaminantes a níveis seguros à saúde humana e compatíveis com a proteção dos corpos hídricos (BEZERRA, 2019).

De acordo com os estudos de Andrade, Tavares e Mahler (2007) e Ribeiro et al., (2025) a fitorremediação apresenta uma vasta versatilidade, podendo ser empregada em meio aquoso, solo ou ar, com processos compreendidos por fitoextração, fitoestabilização, fitovolatilização, fitodegradação e rizofiltração (Figura 2). Tendo a predominância, de acordo com as características do contaminante e eficiência por meio das características específicas das plantas associadas, como uma boa capacidade de absorção, sistema radicular profundo, acelerada taxa de crescimento, fácil manejo e que apresentem uma grande resistência ao poluente.

Figura 2 – Representação dos processos da fitorremediação.



Fonte: Adaptado de Bezerra, 2019.

Ainda esses autores, descrevem que a fitoextração é o mecanismo pelo qual as plantas conhecidas como hiperacumuladoras, absorvem contaminantes como metais pesados (chumbo (Pb), zinco (Zn) e cobre (Cu)) do solo por meio das raízes e os translocam para ser acumulados em seus caules e folhas. Essas espécies possuem significativa tolerância fisiológica a concentrações de metais e capacidades de acumular concentrações muito superiores que outras plantas e, idealmente, por possuírem crescimento rápido e alta produção de biomassa, como ocorre na maioria das espécies da família Brassicáceas e Asteraceae.

Na fitoestabilização, o objetivo principal é a imobilização do poluente no local, o que leva à redução de sua biodisponibilidade e dispersão. As plantas atuam de forma que absorvem e retém os poluentes nas raízes e na zona radicular, provém a sua precipitação. Deve-se essas, possuir um sistema radicular denso e fibroso que impede a erosão, sendo comum o uso de gramíneas e leguminosas adaptadas, que mantêm os contaminantes com insignificante translocação para a parte aérea (BEZERRA, 2019; BARRETO, 2011). Enquanto a fitovolatilização consiste na absorção de contaminantes pela planta, seguida de sua transformação e liberação na forma de compostos voláteis para a atmosfera por meio da

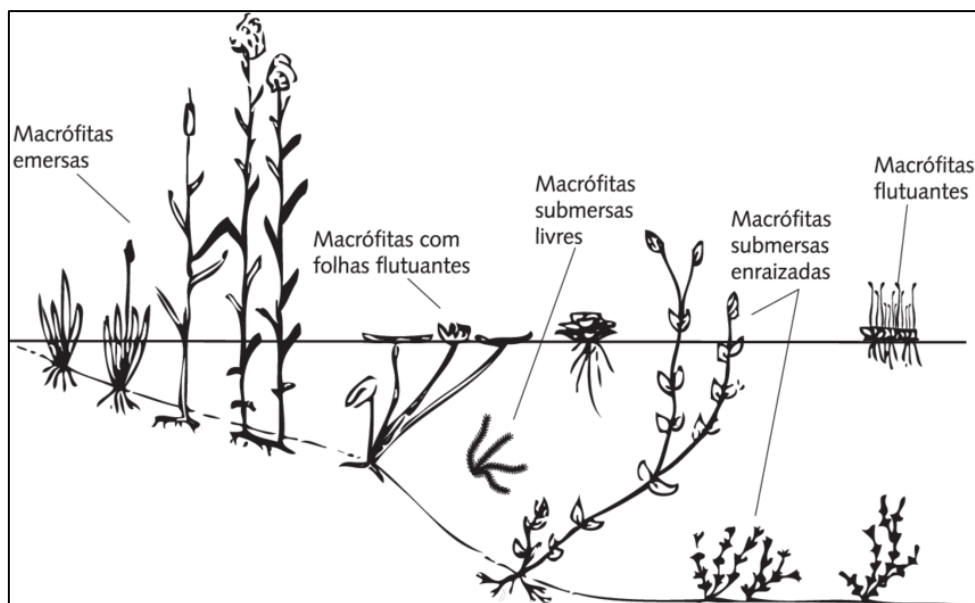
transpiração. As plantas adequadas são aquelas com alta taxa de transpiração e capacidade metabólica para converter os poluentes em formas voláteis, como é o caso de algumas espécies de álamo (*Populus spp.*) (ANDRADE; TAVARES; MAHLER, 2007).

A fitodegradação envolve a degradação metabólica de poluentes orgânicos, como pesticidas e hidrocarbonetos, por meio de enzimas vegetais. A eficácia deste mecanismo depende da capacidade enzimática da planta e da sua interação com a comunidade microbiana da rizosfera (zona de influência das raízes) (LAMEGO; VIDAL, 2007; DAS; PAUL, 2023). As plantas com metabolismo robusto e rápido crescimento, são destacadas por Andrade, Tavares e Mahler (2007) como altamente eficientes na fitodegradação de uma variedade de compostos orgânicos persistentes no ambiente, como benzeno, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAPs), tricloroetileno (TCE) e solventes industriais como o tetracloroetileno (PCE). Já na rizofiltração, ou sistemas hidropônicos, refere-se em conduzir a água residuária por leitos artificiais cultivados com espécies específicas. Nesse sistema, a remoção dos compostos solúveis na rizosfera ocorre por meio de processos bióticos e abióticos, o qual pode ser adsorvido, absorvidos, precipitados ou acumulados nas raízes e tecidos vegetais da planta (DAS; PAUL, 2023).

3.4.1. MACRÓFITAS AQUÁTICAS NA FITORREMEDIAÇÃO

Macrófitas aquáticas ou plantas aquáticas vasculares, caracterizam-se por ser todas as plantas cujas partes fotossinteticamente ativas estão de forma contínua, ou em determinados períodos, submersas em água ou flutuantes em sua superfície (BARRETOS, 2011). As macrófitas aquáticas são classificadas em diferentes grupos (emersas, submersas livres, submersas enraizadas e flutuantes), de acordo com o seu biótipo e a forma como interagem com o corpo hídrico (Figura 3).

Figura 3 – Grupos de macrófitas aquáticas.



Fonte: Adaptado de Esteves, 2011.

Esteves (2011) descreve as macrófitas emersas como plantas com raízes firmemente ancoradas no sedimento, em que mantêm suas estruturas foliares ativas fora da lâmina d'água. Em contraste, as macrófitas com folhas flutuantes também possuem raízes fixadas ao substrato, mas suas folhas repousam sobre a superfície da água. Em ambientes totalmente submersos, existem as macrófitas submersas enraizadas, que, apesar de estarem fixadas no sedimento, crescem totalmente submersas na água. Já as macrófitas submersas livres são plantas que não possuem ancoragem no sedimento e permanecem flutuando na água, geralmente em zonas com baixa turbulência. E as macrófitas flutuantes, caracterizam por ser plantas que se sustentam e se movem livremente sobre a superfície da água.

De acordo com Brito (2021), o uso de macrófitas aquáticas flutuantes na fitorremediação representa uma tecnologia eficaz para o tratamento de efluentes industriais e domésticos, pois além de serem uma abordagem economicamente vantajosa, mediante os custos operacionais reduzidos, com baixa taxa de degradação do local e facilidade de manejo, contribuem para melhorias significativas na qualidade do efluente tratado. Uma vez que, nesses sistemas, as macrófitas atuam em conjunto com microrganismos para remover os compostos através de processos como absorção, fixação e degradação.

Na revisão realizada por Andrade, Tavares e Mahler (2007), dentre as espécies com reconhecida capacidade remediadora, a *Pontederia crassipes* Mart. conhecida popularmente como aguapé ou jacinto-de-água, é uma espécie de macrófita aquática flutuante que possui um sistema radicular que funciona como filtro mecânico, o qual, retém por adsorção o material orgânico e metal pesado presente na água. Os autores indicam que esta macrófita é reconhecida como um eficiente fitorremediador, que age como hiperacumulador e demonstra-se, em diversos estudos, uma opção viável e sustentável para projetos de fitorremediação, em vista seus resultados de até 85% na redução de metais pesados e matéria orgânica, além de possuir uma acelerada taxa de crescimento.

Estudos realizados por Tran et al. (2019), com o uso da espécie *Canna x generalis* da família Cannaceae em sistemas híbridos de *wetlands* para o tratamento de águas residuárias, demonstraram resultados positivos no tratamento de nutrientes e poluentes, com redução de até 77% nos níveis de fósforo e 68% de nitrogênio amoniacal durante a fase de desenvolvimento.

Montoya (2010) avaliou em seu estudo comparativo a remoção de matéria orgânica em áreas úmidas por meio das espécies como a *Canna limbata*, *Phragmites* sp. e *Heliconia psittacorum* L. f. Os resultados apresentaram elevada eficiência no tratamento de efluentes com altas concentrações de carga orgânica, com um alcance de 97,49% de redução de DBO e 93,50% de redução de DQO.

Em um experimento cultivando a *Cyperus alternifolius* L. e a *Typha Latifolia* L. no tratamento de águas residuárias por leito de macrófitas em uma universidade na região da Angola, foi observado a qualidade do efluente tratado, assim como a eficácia dessas plantas no sistema de tratamento gerado. A *Cyperus alternifolius* L. se mostrou uma excelente opção para a redução de DBO (91,6%) e SST (97,0%) (FIDELE; MBUNGU; NZUZI, 2022).

Borges e Araujo (2023) indicam também que, a eficiência desses sistemas é notável na redução do processo de eutrofização, pois as macrófitas promovem a retenção e absorção de nutrientes como nitrogênio e fósforo. E, além disso, são capazes de remover cargas significativas de metais pesados, bem como coliformes termotolerantes. No entanto, ressalta-se que o desempenho na remoção desses compostos varia conforme a espécie de macrófita e os mecanismos específicos de cada sistema.

3.5. LEGISLAÇÃO AMBIENTAL APLICADA AO TRATAMENTO DE EFLUENTE DE QUEIJARIA

A legislação ambiental brasileira possui diretrizes rígidas para o lançamento de efluentes tratados em corpos receptores, com o intuito de garantir a preservação do meio ambiente, regularização da qualidade da água e proteção dos ecossistemas.

Em âmbito federal, a Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) estabelece os padrões e condições para o lançamento de efluentes no Brasil e na esfera estadual, o Decreto Estadual nº 8.468/76 aprova o Regulamento da Lei nº 997, de 31 de maio de 1976, que dispõe sobre o controle da poluição do meio ambiente. Tais normas, indicam os limites máximos para a concentração de parâmetros orgânicos e inorgânicos que devem ser atendidos por quaisquer fontes poluidoras que lançam seus efluentes em corpos receptores, garantindo a proteção do meio ambiente. Os principais parâmetros podem ser observados conforme Tabela 3.

Tabela 3 - Padrões de lançamento de efluentes conforme a norma federal e estadual.

Parâmetro	Valor Máximo (Resolução CONAMA 430/2011)	Valor Máximo (Decreto Estadual nº 8.468/76)	Unidade
pH	$5 \leq \text{pH} \leq 9$	$5 \leq \text{pH} \leq 9$	-
Temperatura	inferior a 40° graus	inferior a 40° graus	°C
DQO	-	-	-
DBO	120 mg.L ⁻¹ ou uma remoção mínima de 60%	60 mg.L ⁻¹ ou uma remoção mínima de 80%	-
Turbidez	-	-	uT (NTU)
Sólidos em Suspensão Totais (SST)	Remoção mínima de 20%, após desarenação.	-	mg.L ⁻¹
Nitrogênio Amoniacal Total	20	-	-
Fósforo Total (P)	10	-	mg.L ⁻¹

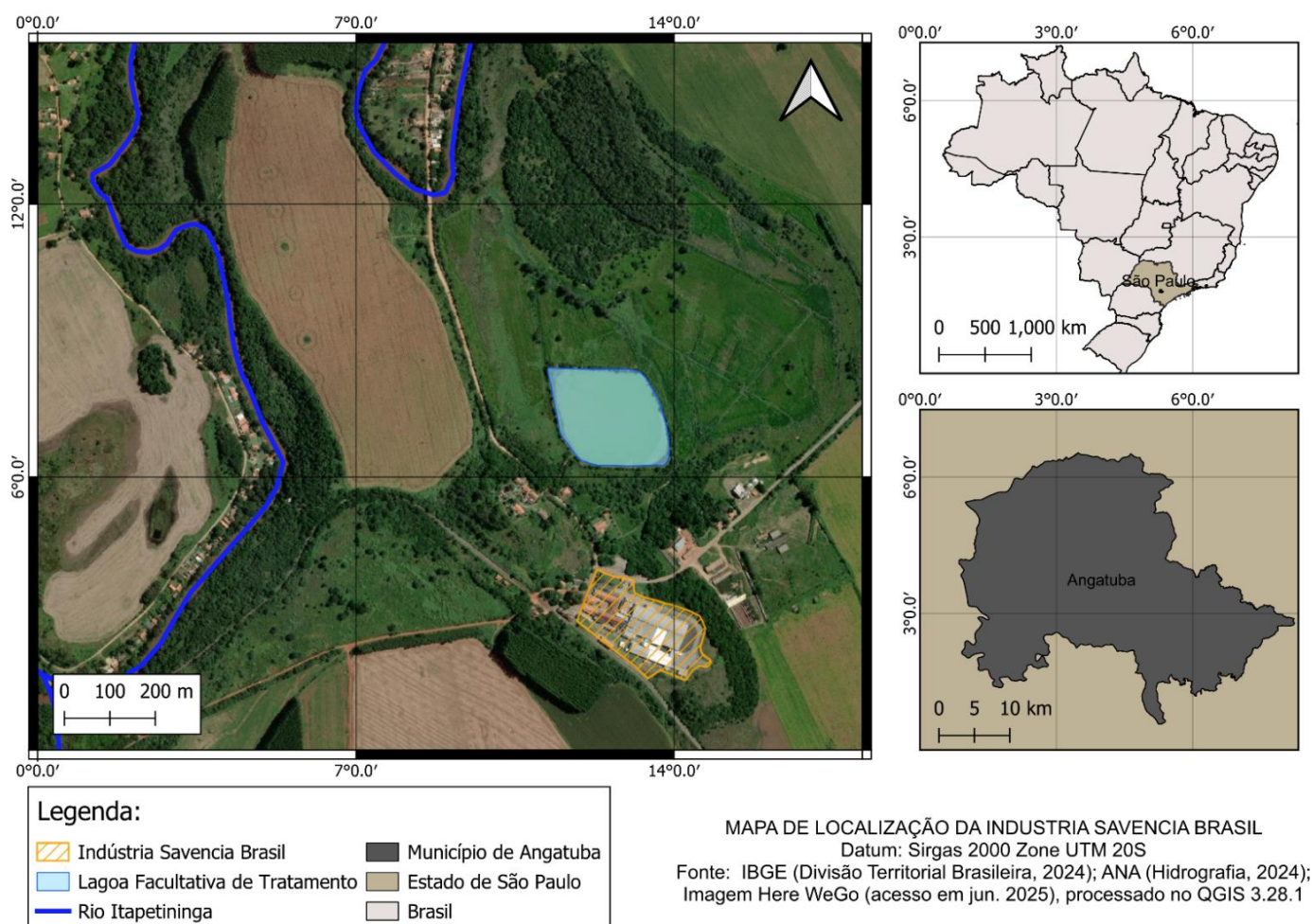
Fonte: Adaptado de CONAMA (2011) e Decreto Estadual 8.468/76.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. ÁREA DE ESTUDO

A área na qual o estudo foi conduzido, pertence a indústria de laticínio Savencia Brasil, especificamente em sua unidade de Angatuba/SP. A unidade está localizada na região sudoeste do Estado de São Paulo e tem como corpo receptor de seu efluente tratado o Rio Itapetininga, pertence à Bacia do Alto Paranapanema, a qual possui uma grande relevância para o equilíbrio ecológico e social na região, além de aspectos econômicos e turísticos (Figura 4).

Figura 4 - Mapa de localização da indústria Savencia Brasil, unidade de Angatuba - São Paulo.



Fonte: Autoria própria, 2025.

A indústria caracteriza-se por ter uma produção de 24 mil toneladas de queijo processado por ano¹, com uma variedade de queijos fabricados em seu catálogo, destaca-se pelos produtos Polenguinho[®], queijos especiais como *camembert*, *brie* e *gorgonzola*, além de outros derivados lácteos, como o requeijão e *cream cheese*.

O processo de produção da indústria envolve várias etapas de geração de efluentes líquidos ricos em matéria orgânica, óleos e graxas, nitrogênio (N), fósforo (P) e outros compostos, o que resulta na geração diária de aproximadamente 300 m³ de efluentes². Assim, com o intuito de manter os padrões de lançamento de efluentes conforme a Resolução CONAMA n.º 430/2011 e o Decreto Estadual nº 8.468/76, a unidade conta com uma ETE caracterizada pela presença de gradeamento, caixas de gorduras, caixas de distribuição, filtros anaeróbios e lagoa facultativa de tratamento de efluentes.

4.2. LAGOA FACULTATIVA DE TRATAMENTO DE EFLUENTES DA INDUSTRIA

A lagoa facultativa de tratamento de efluentes, possui uma área superficial de 43.600m², uma profundidade média de 1,5 metros e um volume médio de água residual estimado em 300 mil litros por dia. Em regime contínuo de funcionamento, recebe e trata 100% do efluente líquido gerado não só em toda linha de produção, como também, de todo o sistema operacional da empresa².

Desse modo, com o objetivo de aprimorar a qualidade do efluente tratado, foram implementadas, em 2023, novas ações voltadas ao aperfeiçoamento do controle de parâmetros como turbidez e pH, além do incremento das remoções de DBO e DQO por meio de diferentes processos biológicos. Essa iniciativa, denominada como Projeto Gênesis, foi dividida em cinco fases, citadas anteriormente, que buscam otimizar todo o processo de tratamento na lagoa e em 2024, passou a ser desenvolvida em parceria com a universidade.

Assim, como ponto focal desse estudo a Fase 3: Fitorremediação, um teste inicial foi realizado pela empresa, em uma pequena área próxima ao ponto de saída do efluente tratado (Figura 5), a fim de avaliar o cenário de adaptação e a segurança na logística de manutenção, em virtude da presença de animais silvestres na lagoa².

¹ Informação fornecida pelo gerente industrial da unidade Savencia Brasil – Angatuba/SP, via comunicação direta em 2024.

² Informação fornecida pela engenheira ambiental da unidade Savencia Brasil – Angatuba/SP, via comunicação direta em 2024.

Figura 5 - Área piloto da fitorremediação na lagoa (1) e a perspectiva de expansão (2) e (3) em relação ao ponto de entrada do efluente bruto (PE) e ao ponto de saída do efluente tratado (PS).



Fonte: Adaptado de Savencia Brasil, 2024.

4.3. DELIMITAÇÃO DAS ÁREAS DE FITORREMEDIAÇÃO

Para delimitação das áreas de fitorremediação na lagoa foi estabelecida uma zona que abrange o ponto de saída dos efluentes líquidos tratados para descarga ao Rio Itapetininga, adjacente à entrada do efluente bruto, como observado na Figura 5. No que se refere a estrutura utilizada, com o auxílio dos colaboradores de manutenção da indústria, delimitou-se uma área total de 48 m², utilizando 15 estacas de madeiras de 120 cm para fixação de 15 metros de rede de arame galvanizado de 80cm, formando um semicírculo, conforme Figura 6.

Figura 6 - Delimitação da área para fitorremediação na lagoa facultativa de tratamento da indústria Savencia Brasil.



Fonte: Savencia Brasil, 2024.

4.4. SELEÇÃO DAS ESPÉCIES DE MACRÓFITAS AQUÁTICAS

Para escolha das duas espécies de macrófitas aquáticas a serem utilizadas nas novas zonas de fitorremediação, utilizou-se da base de dados acadêmicos eletrônicos, como o periódico CAPES, Scientific Electronic Library Online (*Scielo*), *Scopus* e Google Acadêmico para a localização de publicações técnico-científicas com a relevância de estudo na temática de i) fitorremediação em lagoas de estabilização, ii) aplicação de fitorremediação no tratamento de efluentes indústrias e, especificamente, no iii) aplicação de fitorremediação no tratamento de efluentes de laticínios.

Após o levantamento das publicações, realizou-se a análise das espécies com potencial para o tratamento de efluentes provenientes de queijarias, mediante a triagem de estudos que indicavam a facilidade de multiplicação, adaptabilidade ao ecossistema local e a capacidade de redução dos parâmetros característicos do efluente e foco desse estudo. Dessa forma, considerou-se, a espécie de grande incidência nos corpos hídricos da região, a *Pontederia crassipes* Mart. (aguapé), e espécies com estudos promissores, como a *Canna x generalis* (beri silvestre) e *Cyperus alternifolius* L. (sombriinha chinesa).

Adicionalmente, fatores como a disponibilidade logística na região e a viabilidade econômica das espécies para cultivo foram, também, determinantes na escolha.

4.5. IMPLEMENTAÇÃO DAS MACROFITAS ÁQUATICAS NA LAGOA FACULTATIVA

As espécies foram implementadas na lagoa de forma gradual, com início em agosto de 2024 no ponto piloto realizado, conforme descrito anteriormente. Nesse ponto, utilizou-se inicialmente os aguapés, coletados com auxílio de *bags* por funcionários de manutenção da empresa, no corpo hídrico próximo a região. Posteriormente, dada a característica flutuante da espécie, as plantas foram dispersas diretamente na delimitação da fitorremediação (Figura 7).

Figura 7 – Coleta manual dos aguapés em um lago próximo a região e armazenadas com auxílio de *bags* (A), posteriormente a introdução na lagoa (B).



Fonte: Savencia Brasil, 2024.

Para as demais delimitações, em vista que a espécie de sombrinha-chinesas e beri-silvestre por caracteriza-se como macrófitas aquáticas emergentes, foram introduzidas inicialmente no

leito da lagoa (Figura 8) e posteriormente, com o auxílio de flutuadores do estilo espaguete, suspensas na superfície da lagoa (Figura 9) em setembro de 2024.

Figura 8 - *Canna x generalis* inserida no leito da lagoa.



Fonte: Savencia Brasil, 2024.

Figura 9 – Espécies *Canna x generalis* e *Cyperus alternifolius* L. em suspensão na superfície da lagoa.



Fonte: Savencia Brasil, 2024.

Para essa estrutura suspensa, cortou-se a rede de arame galvanizado em formato retangular, com as medidas de aproximadamente 90cm×60cm. Em seguida, com o auxílio da fita de hellermann de 15cm, os flutuadores do tipo espaguete foram fixados à rede, formando assim, uma base sustentadora para as espécies. As plantas tiveram os caules cuidadosamente presos à malha do arame com o auxílio da fita hellermann, o que possibilitou a flutuação e sustentação na superfície da lagoa (Figura 10).

Figura 10 – Estrutura utilizada para inserir as espécies *Cyperus alternifolius* L. (A) e *Canna x generalis* (B) em suspensão na superfície da lagoa.



Fonte: Acervo pessoal, 2024.

4.6. MONITORAMENTO E CONTOLE

O monitoramento do crescimento das macrófitas foi realizado com o apoio dos colaboradores de manutenção da empresa, conforme a disponibilidade do setor. Durante as observações, avaliou-se o desenvolvimento das raízes no meio, o aumento da densidade e da massa radicular das espécies, como pode ser observado na Figura 11.

Figura 11 – Observação das espécies *Pontederia crassipes* Mart (A), *Cyperus alternifolius* L. (B) e *Canna x generalis* (C-D), após o primeiro mês de implementação.



Fonte: Savencia Brasil, 2024.

Com base nos monitoramentos realizados, observou-se que a *Pontederia crassipes* Mart., apresentou rápido crescimento já nas três primeiras semanas de introdução na lagoa, expandindo conforme o esperado dentro da delimitação realizada. Enquanto as plantas *Cyperus alternifolius* L. e *Canna x generalis*, apresentam crescimento de forma gradual, adaptando bem as condições da lagoa e a estrutura flutuante realizada. Adicionalmente, verificou-se que a *Canna x generalis* demonstrou maior aumento da densidade e massa radicular quando suspensas na superfície da lagoa.

Conforme recomendado por Brito (2021) em seu estudo de biorremediação em lagoa facultativa, para evitar a ocorrência de impactos negativos ocasionados no crescimento desenfreado das espécies, mascarando os resultados ou causando o desequilíbrio no ambiente, foi estabelecido um plano de controle para sua biomassa.

O controle do desenvolvimento das macrófitas aquáticas seguiu as diretrizes de Pompêo (2017), que preconiza a utilização de métodos físicos, subdividido em manual e mecânico, biológicos e químicos, aplicados conforme a necessidade observada durante o estudo. Os procedimentos físicos envolveram a remoção manual, com aplicação de barreiras ou cortes utilizando instrumentos simples, como tesouras e facas. Quando necessário, recorreu-se à remoção mecânica, empregando equipamentos de maior porte, como lâminas cortantes deslizantes. À vista disso, durante o período de estudo, monitorou-se além do crescimento das espécies, aspectos como a expansão das plantas dentro do limite estabelecido, condições das folhas e raízes. Assim, a manutenção dessas áreas foi realizada sempre que necessário, utilizando dos métodos físicos manuais indicados por Pompêo (2017), por meio da sua simplicidade operacional e baixa perturbação no meio.

4.7. AMOSTRAGEM E MONITORAMENTO DOS DADOS

Apesar do objetivo inicial desse estudo contemplar a análise de parâmetros como alcalinidade, nitrito e nitrato, mediante ao escopo comercial predefinido com o laboratório, a amostragem e o monitoramento desses indicadores ficaram limitados no período avaliado. A definição dos parâmetros foco pH, DBO, DQO e OD para monitoramento contínuo seguiu a proposta consolidada entre a empresa e o laboratório, considerando o histórico operacional da

lagoa facultativa, no qual esses indicadores apresentaram maior necessidade de intervenção para garantir conformidade com a legislação vigente.

No entanto, nos meses em que as espécies demonstraram maior maturidade (novembro de 2024 e fevereiro de 2025), para se entender melhor o desempenho do sistema, inseriu-se a análise pontual dos parâmetros fósforo total e nitrogênio amoniacal total no escopo do relatório de análises do laboratório. Ressalta-se ainda que essa abordagem não compromete a interpretação global da eficiência do sistema, uma vez que os parâmetros focais de monitoramento refletem diretamente a carga orgânica e a dinâmica microbológica, aspectos centrais para avaliar o desempenho do sistema de tratamento.

Assim, o monitoramento dos dados ocorreu por meio dos relatórios analíticos divulgados pelo laboratório Hidrolabor, sendo esse, um prestador de serviço terceirizado pela empresa e acreditado pelo INMETRO, o qual garante que os procedimentos de coletas de amostras e métodos de análises dos efluentes líquidos estejam em conformidade com os procedimentos descritos no Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (SMWW), na sua 24ª Edição. Os métodos específicos incluem 4500 O C, 5220 D, 5210 B, 4500-H+ B, 4500 NH3E e 4500 P E. A avaliação de desempenho foi determinada por cálculo de eficiência de remoção, como pode ser observado na Tabela 4.

Tabela 4 – Métodos utilizados pelo laboratório para análises dos parâmetros físico-químico ambientais presentes no efluentes líquidos da lagoa facultativa de tratamento da empresa.

Parâmetro Analisado	Referência	Método
Oxigênio Dissolvido (OD)	4500 O C	Eletrométrico (Eletrodo): Medição direta da concentração de OD na amostra usando um eletrodo de membrana (sonda).
Demanda Química de Oxigênio (DQO)	5220 D	Refluxo Fechado e Colorimetria: Oxidação da matéria orgânica por um agente químico forte (K ₂ Cr ₂ O ₇) em meio ácido e aquecimento. A DQO é determinada pela quantidade de oxidante consumido, medida por colorimetria.

Parâmetro Analisado	Referência	Método
Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)	5210 B e 4500 O-C	Teste de 5 Dias (DBO5): Medição da diferença entre a concentração inicial e final de OD em uma amostra diluída, após 5 dias de incubação a 20 °C. Reflete o oxigênio consumido por microrganismos para decompor a matéria orgânica.
pH	4500-H+ B	Eletrométrico: Medição da atividade do íon hidrogênio (H ⁺) usando um medidor de pH e um eletrodo de vidro, indicando a acidez ou alcalinidade da amostra.
Nitrogênio Amoniacal Total	4500 NH ₃ E	Eletrométrico (Eletrodo Seletivo de Íons - ISE): Medição direta do N amoniacal (NH ₃ e NH ₄ ⁺) usando um eletrodo seletivo de íons.
Fósforo Total	4500 P E	Ácido Ascórbico: oxidação de todas as formas de fósforo a ortofosfato, seguido da formação de um complexo azul medido por espectrofotometria.
Performance do Sistema	N/A	Cálculo da Remoção (Eficiência): Determinação da porcentagem de redução de um parâmetro entre o ponto de entrada e o ponto de saída.

Fonte: Elaborado pela autora (2025) com base nos relatórios analíticos da Hidrolabor e no SMWW, 24ª Edição.

Dessa maneira, estabeleceu-se dois pontos de amostragem, os quais correspondem ao ponto fixo de entrada do efluente bruto para a lagoa facultativa de tratamento e o ponto fixo de saída do efluente tratado, respectivamente. As coletas ocorreram entre novembro de 2024 e agosto de 2025, período o qual foi definido conforme o acompanhamento e manutenção das espécies nas zonas de fitorremediação. Além disso, a frequência de amostragem considerou a disponibilidade operacional do setor, como também as condições climáticas e técnicos indicados pelo laboratório.

4.8. ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os dados referentes aos parâmetros físico-químicos no afluente e efluente da lagoa foram analisados por meio de testes estatístico descritivos, a fim de verificar a tendência amostral, performance e estabilidade do sistema de tratamento fitorremediador, bem como, visualizar a

distribuição e redução das concentrações, comparando-as com os requisitos de lançamento de efluentes em corpos hídrico, estabelecidos a nível federal pela resolução CONAMA nº 430/2011 e a nível estadual, conforme o Decreto Estadual nº 8.468/76. Com isso, foram calculados as médias aritméticas, a mediana, os valores máximos e mínimos, o desvio padrão, os quartis inferior e superior, como também, a eficiência de remoção de cada parâmetro.

Em seguida, aplicou-se o teste de normalidade de Shapiro Wilk para verificar se os dados apresentavam distribuição normal. Para os dados de DBO, DQO e pH que apresentaram distribuição normal, realizou o Teste T pareado e aos dados com distribuição não normal, como o parâmetro OD, utilizou-se do Teste de Wilcoxon. Ambos os testes foram empregados a fim de encontrar diferenças significativas ($p \leq 0,05$) e não significativas ($p > 0,05$) entre os valores dos parâmetros físico-químicos encontrados na entrada e saída da lagoa facultativa de tratamento (BRITO, 2021).

Ressalta-se ainda que, para os parâmetros como Fósforo (P) e Nitrogênio Amoniacal Total (NH_3) os valores de significância não foram determinados nos testes indicados, pois a quantidade de dados foi insuficiente para a utilização da estatística descritiva. Dessa forma, realizou comparações simples, devido ao tamanho reduzido das amostras disponíveis. Com essa abordagem, tornou-se possível realizar uma tendência interpretativas dos dados obtidos, sem comprometer a efetividade das análises.

Para visualizar o comportamento temporal e a eficiência de remoção dos parâmetros no sistema de tratamento ao longo do período de monitoramento, utilizou-se representações gráficas por meio de gráficos *box-plots* e de barras comparativas. Todos os gráficos e análises estatísticas foram realizados por meio do *Software R* (version 4.5.1, 2025) com auxílio do Microsoft Excel 2016.

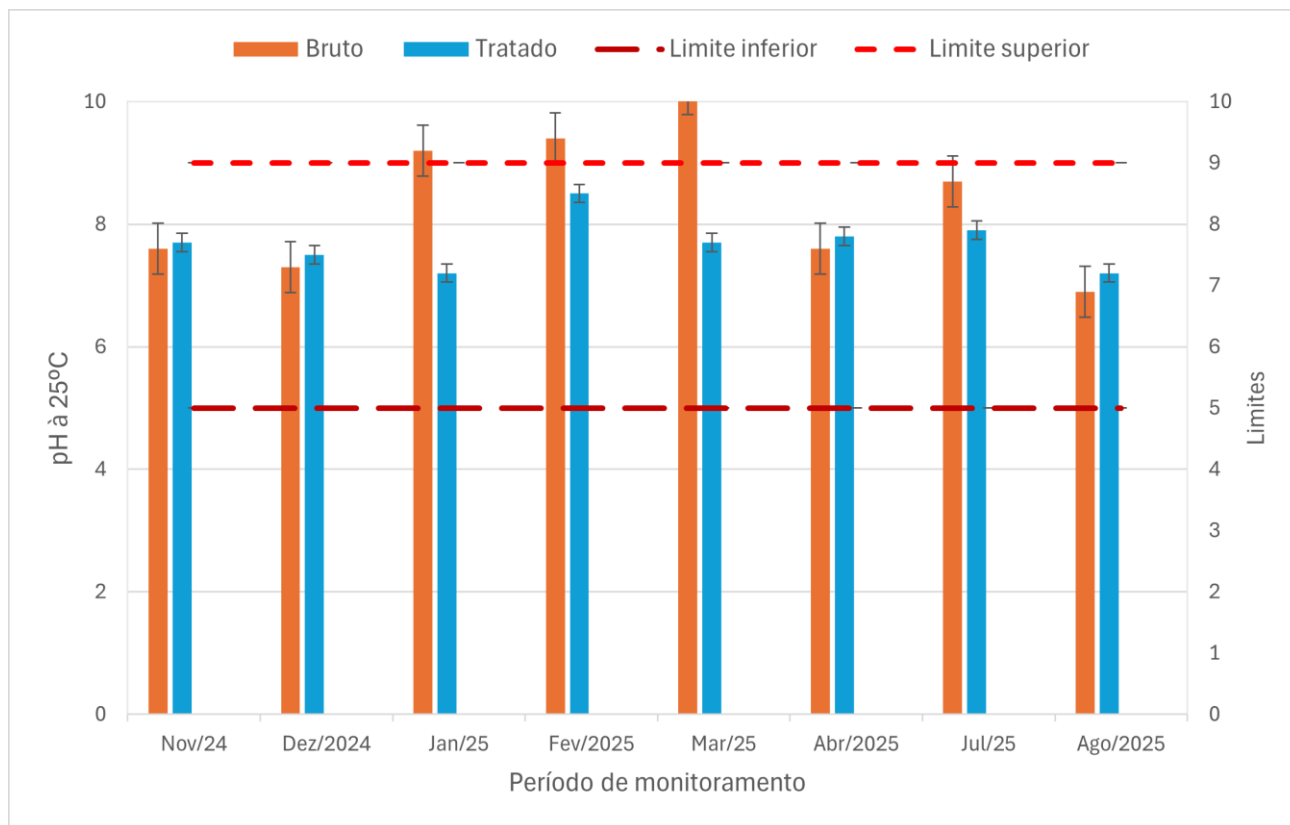
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. ANÁLISE DOS PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS

5.1.1. POTENCIAL HIDROGENIÔNICO (pH)

Por meio dos padrões estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 430/2011 e o Decreto Estadual nº 8.468/76, que determina para o lançamento de efluentes tratados em corpos receptores valores de pH entre 5,0 e 9,0, o efluente tratado durante o período de estudo esteve em conformidade com a legislação vigente, conforme observado na Figura 12.

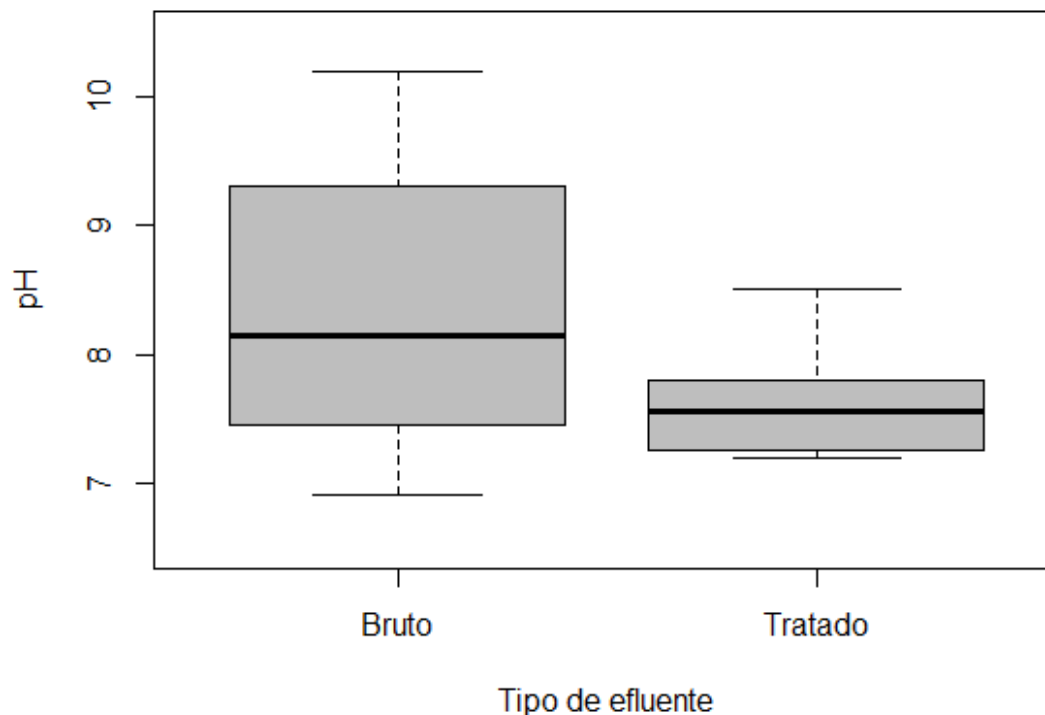
Figura 12 – Variação temporal do pH na lagoa facultativa durante o monitoramento da fitorremediação com as três espécies de macrófitas aquáticas em relação aos limites de lançamentos exigidos pela legislação vigente.



Fonte: Autoria própria, 2025.

De acordo com a análise estatística, o parâmetro pH apresentou diferenças significativas entre o efluente bruto e o efluente tratado, conforme observado na Figura 13. Devido à normalidade dos dados confirmados pelo teste de Shapiro Wilk, utilizou-se do Teste T pareado para comparação entre as médias dos valores de entrada (bruto) e saída (tratado) encontrados na lagoa, cujo resultado do valor p foi de $p = 0,04517$ e evidenciou a diferença estatisticamente significativa ($p > 0,05$) entre as médias dos dados, o que demonstra que o processo de fitorremediação atuou de forma satisfatória na estabilização do pH.

Figura 13 - Gráfico da distribuição geral dos valores de pH na entrada da lagoa facultativa antes do sistema de fitorremediação e na saída da lagoa após o sistema de fitorremediação (p -value = 0,04517).



Fonte: Autoria própria, 2025.

De acordo com a análise descritiva, os valores de pH na entrada da lagoa apresentaram uma maior amplitude de variação, com valores distribuídos entre 6,9 a 10,2 e valores medianos de 8,15. A dispersão observada pode sugerir a instabilidade na qualidade do efluente antes do tratamento, possivelmente relacionada a vasta variedade da linha de produção na indústria, bem como à presença de matéria orgânica em decomposição e à alta atividade microbológica, fatores que podem provocar tanto elevação quanto redução do pH em função da liberação de CO_2 e compostos nitrogenados (VON SPERLING, 1996). Enquanto na saída da lagoa, os valores de pH demonstraram uma redução da variabilidade e estabilização dos valores, com faixa entre 7,2 e 8,5, mediana de 7,55 e média de $7,65 \pm 0,43$. Esses resultados indicam que o sistema de fitorremediação promoveu a homogeneização do meio e a manutenção de condições mais estáveis do pH, indo-se da neutralização para um meio levemente alcalino.

Além disso, a estabilização do pH na faixa observada indica uma possível associação à atividade fotossintética das macrófitas aquáticas cultivadas no sistema de fitorremediação e

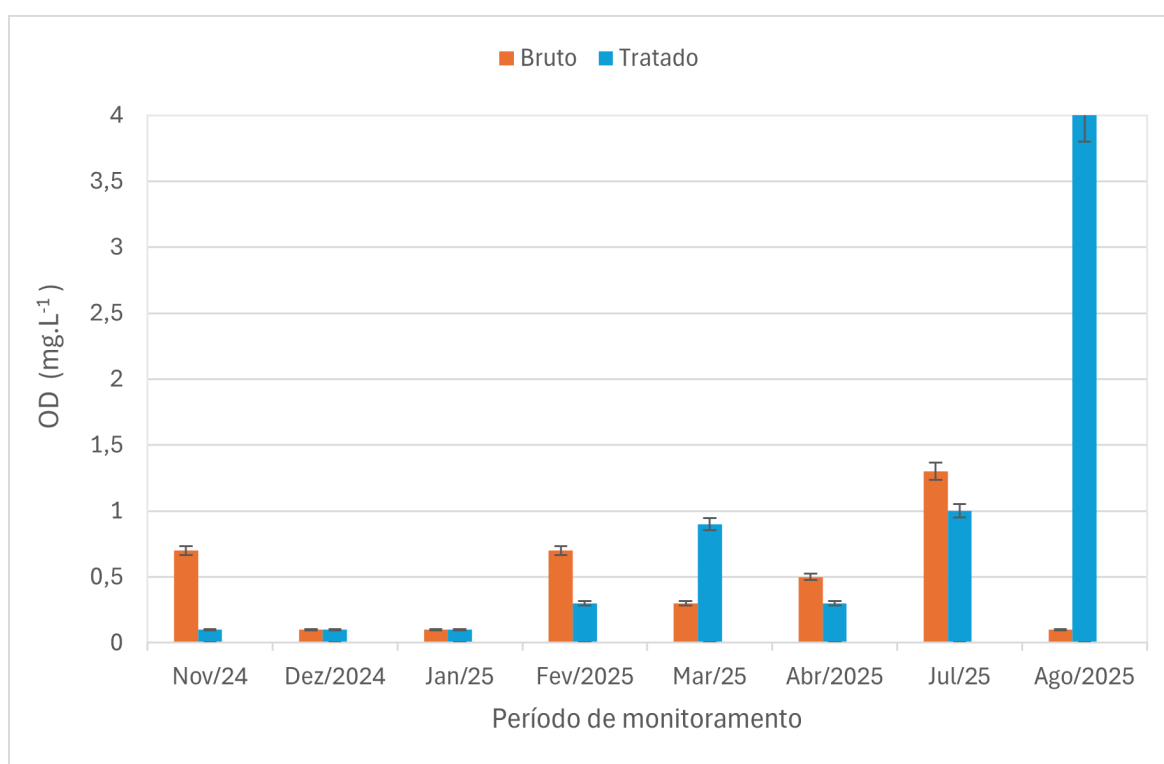
dos microrganismos heterotróficos associados as suas raízes. Durante o processo fotossintético, ocorre o consumo de dióxido de carbono (CO_2) dissolvido, o que tende a elevar o pH da água. Essa dinâmica é típica de sistemas com elevada taxa de assimilação de carbono, refletindo um bom desempenho do processo biológico de tratamento e, adicionalmente, por estarem cultivadas na zona na zona de polimento do sistema, a estabilidade é potencializada por este trecho já apresentar um pH mais estável, em função dos processos biológicos que predominam nas etapas anteriores do tratamento (VON SPERLING, 1996; ALESSANDRO et al., 2014; MONTOYA et al, 2010; MAHMOUDI et al., 2024).

Resultado semelhante também foi observado por Brito (2021) na investigação do potencial de macrófitas em associação com biofilmes para tratar efluentes em sistemas de lagoas, no qual o pH permaneceu entre 7,6 e 8,0. Borges e Araujo (2023) relataram a estabilização do pH por meio da fitorremediação com macrófita aquática flutuante no tratamento de efluentes de uma indústria de óleo de soja. O estudo também indicou, que após a adoção desse sistema, dispensou-se a utilização de agentes químicos para promover o ajuste do pH, o que reforçou a eficiência do processo natural de fitorremediação.

5.1.2. OXIGÊNIO DISSOLVIDO (OD)

A análise do oxigênio dissolvido do efluente tratado foi realizada para o efluente proveniente da saída da lagoa facultativa, antes do seu lançamento no corpo receptor. É importante ressaltar que os resultados obtidos refletem a qualidade do efluente nessa fase e não refletem as concentrações diretamente medidas no ponto de descarga no Rio Itapetininga, apresentados conforme a figura 14.

Figura 14-Variação temporal do OD na lagoa facultativa durante o monitoramento da fitorremediação com as três espécies de macrófitas aquáticas.



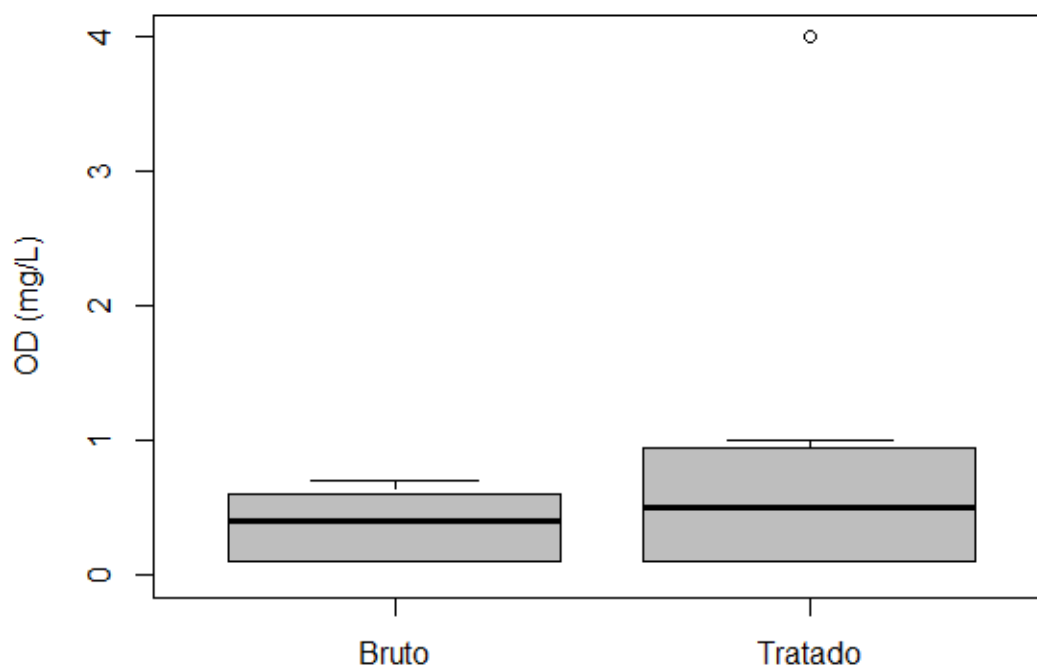
Fonte: Autoria própria, 2025.

O teste de normalidade apresentou $p = 0,0007874$, o que indica que os dados não seguem uma distribuição normal, sendo, portanto, necessária a utilização de um teste não paramétrico para comparação entre as concentrações. O teste de Wilcoxon resultou em $p = 0,787$, o que evidenciou a ausência de diferença estatisticamente significativa entre os valores de OD antes e após o processo de fitorremediação.

Como pode ser observado na Figura 15, a análise descritiva reforçou o resultado de que não há diferença estatisticamente significativa, visto que a amplitude e as medianas de ambas as concentrações (bruto e tratado) estão em níveis muito próximas e estreitas. No efluente de saída, a mediana está em $0,5 \text{ mg.L}^{-1}$ e a amplitude se estende de $0,1$ a $1,0 \text{ mg.L}^{-1}$. A média de $0,9 \text{ mg.L}^{-1} \pm 0,131$, ligeiramente superior à mediana é influenciada pelo valor atípico presente na série amostral, correspondente a última amostragem no período estudado. Essa variação representa um comportamento oscilante, o que sugere a influência de fatores como o regime operacional da lagoa, que exhibe condições anaeróbias predominantes em sua maior extensão, o

tempo de detenção hidráulico ou condições ambientais que limitam a taxa de fotossíntese e a transferência de oxigênio para a água.

Figura 15 – Gráfico da distribuição geral dos valores de OD na entrada da lagoa facultativa antes do sistema de fitorremediação e na saída da lagoa após o sistema de fitorremediação ($p\text{-value} = 0,787$).



Fonte: Autoria própria, 2025.

A baixa concentração média de oxigênio dissolvido também pode estar relacionada à alta carga orgânica do efluente, característica que favorece a intensa DBO e o consequente consumo do oxigênio disponível na coluna d'água. Embora esse consumo possa ser parcialmente compensado pela atividade fotossintética das macrófitas aquáticas, as quais promovem a liberação de oxigênio durante o período diurno, a mesma biomassa vegetal pode contribuir para a redução do OD durante a noite e em estágios de decomposição, quando ocorre consumo de oxigênio pela respiração e degradação da matéria orgânica acumulada, o que pode explicar os valores medianos inferiores a 1 mg.L^{-1} .

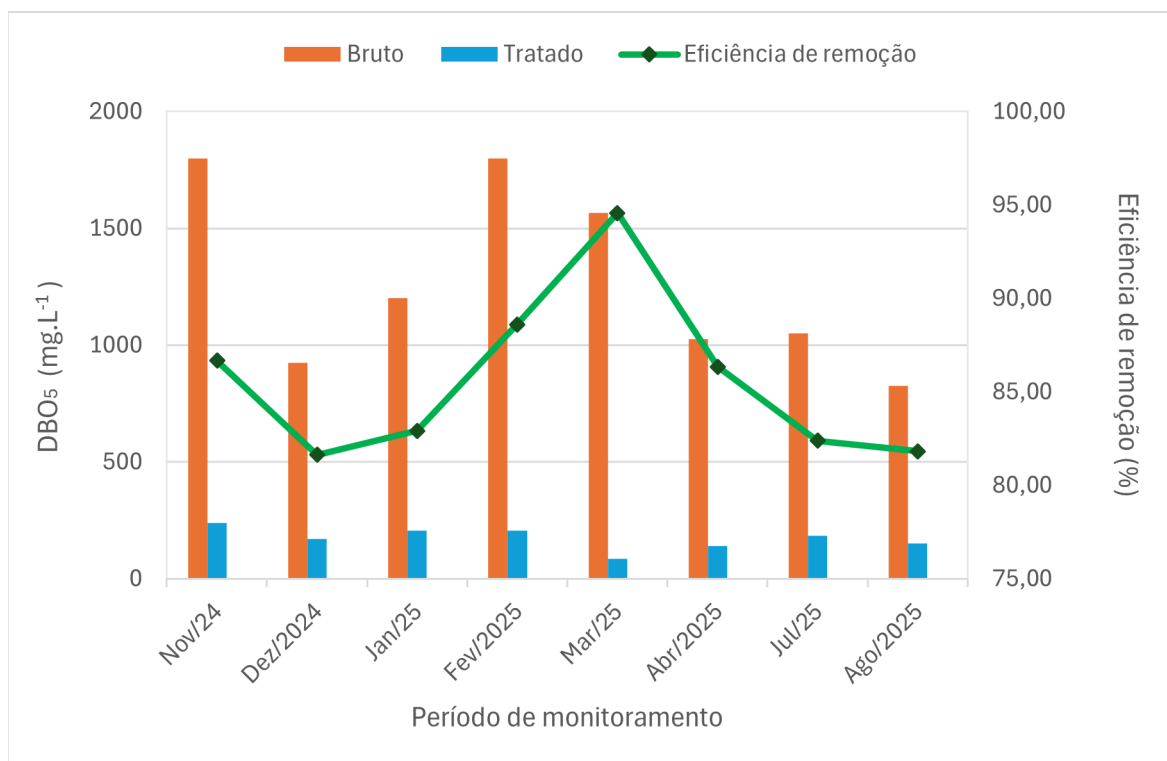
Ademais, os valores observados sugerem que, na zona de amostragem, o consumo respiratório é dominante ou que a aeração fotossintética não é suficiente para saturar a água e a ausência de diferença estatisticamente significativa entre o efluente bruto e tratado, sugere que

o sistema de fitorremediação, nas condições analisadas, não promoveu um aumento eficaz na concentração de oxigênio dissolvido. O valor atípico de $4,0 \text{ mg.L}^{-1}$ no efluente tratado pode, no entanto, representar um momento de amostragem em um ponto sob forte influência da atividade fotossintética superficial pelas macrófitas presentes ou durante um evento de alta aeração atmosférica (VON SPERLING, 1996; MAHMOUDI et al, 2024; DAS e PAUL, 2023).

5.1.3. DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXIGÊNIO (DBO)

O monitoramento temporal demonstrou que a eficiência de remoção da DBO manteve-se acima de 80% em todos os meses estudados, apresentados na Figura 16. O pico de eficiência de 94,5% observado em março/2025 sugere o ápice do desempenho do sistema, o que pode ser atribuído a uma combinação ideal de fatores bióticos, como a estabilidade da comunidade microbiana associada ao sistema radicular das espécies introduzidas na lagoa, e abióticos, como a maior incidência solar e temperaturas ambientes mais altas na região, o que favorece para maior assimilação da matéria orgânica e remoção de nutrientes, equilibrando o meio e potencializando o desenvolvimento das espécies.

Figura 16 – Variação temporal da eficiência de remoção da DBO₅ na lagoa facultativa durante o monitoramento da fitorremediação com as três espécies de macrófitas aquáticas.



Fonte: Autoria própria, 2025

Entre os meses de dezembro/2024 e julho/2025, a zona de fitorremediação apresentou dois rompimentos ocasionados por animais silvestres presentes na lagoa, o que implicou na morte de algumas plantas jovens e na necessidade de uma manutenção mais extensa na área, visto que foi preciso restabelecer a área de delimitação e introduzir novas mudas de aguapés, além da realocação do beri-silvestre e sombrinha chinesa nas estruturas flutuantes. Nesses meses, pode-se observar que as variações na densidade da biomassa vegetal e os processos de manutenção realizados nas zonas de fitorremediação influenciaram nas flutuações no desempenho do tratamento, presenciando um decaimento da eficiência de redução com valores de 81,6% e 82,4%. Outro fator influenciador foi a taxa de decomposição dessas macrófitas, pois durante essa fase, as plantas não apenas deixam de absorver os nutrientes ativamente, como também, retornam matéria orgânica ao meio, por meio da lixiviação de compostos celulares, o que pode elevar a DBO no efluente tratado (BEZERRA, 2019).

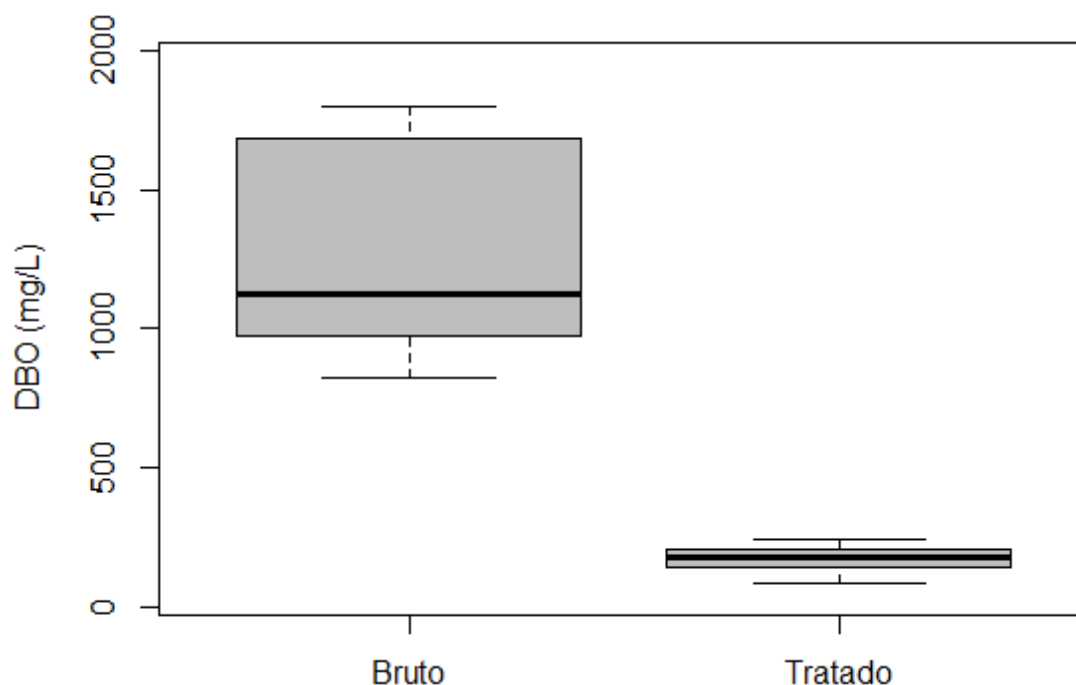
Esse comportamento também é descrito por Andrade, Tavares e Mahler (2007) em seu estudo de fitorremediação como uma tecnologia para melhorar a qualidade de águas residuárias, além de apresentar rendimento semelhantes na remoção de DBO_5 com espécies flutuantes e emergentes. Assim, o desempenho alcançado neste estudo segue com o que foi evidenciado na literatura consultada.

O teste de normalidade aplicado aos dados apresentou $p\text{-value} = 0,9039$, demonstrando que os resultados seguem uma distribuição normal e, por isso, justifica-se o uso do Teste T pareado para análise desse parâmetro. O resultado do teste foi um valor de $p = 0,007882$, o que indica a diferença estatisticamente entre os valores médios da DBO_5 do efluente bruto e do efluente tratado, confirmando a efetividade do sistema de fitorremediação na redução da carga orgânica no meio.

Os valores do efluente bruto apresentaram uma alta variabilidade e concentrações médias elevadas, com valores mínimos de 825 mg.L^{-1} e o máximo encontrado de 1.566 mg.L^{-1} . Observou-se que os valores frequentemente ultrapassaram concentrações de 1.000 mg.L^{-1} , o que reforça uma das principais características do efluente provenientes de queijarias, que é a alta carga orgânica encontrada. Tais dados, seguem de acordo com as faixas de variação encontradas na literatura ($450 - 4.790 \text{ mg.L}^{-1}$) (CETESB, 2006).

Já o efluente tratado (saída da lagoa), apresentou valores de 85 a 240 mg.L⁻¹, com mediana de 177,5 mg.L⁻¹ e média de 172,5 mg.L⁻¹ ± 47,84, evidenciando a diferença significativa indicada no teste, conforme a redução das concentrações de matéria orgânica após o tratamento biológico, observados na Figura 17.

Figura 17 - Gráfico da distribuição geral dos valores de DBO na entrada da lagoa facultativa antes do sistema de fitorremediação e na saída da lagoa após o sistema de fitorremediação (*p-value* = 0,007882).



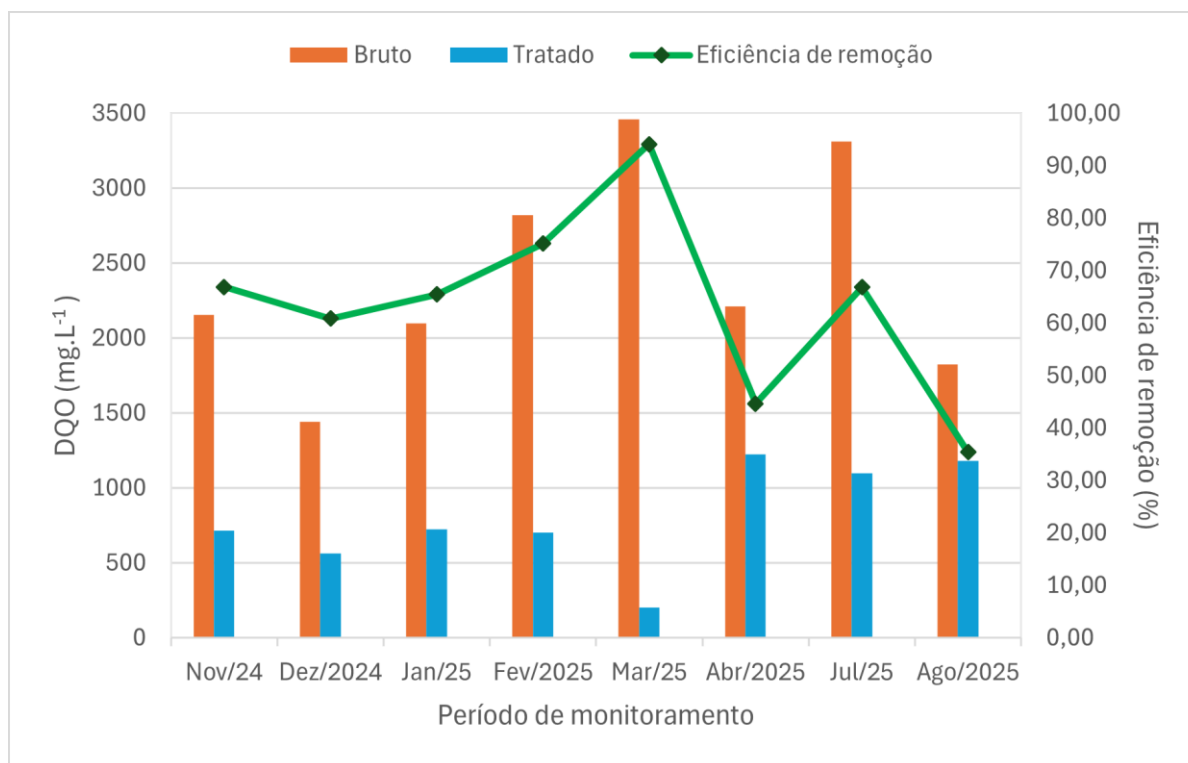
Fonte: Autoria própria, 2025

5.1.4. DEMANDA QUÍMICA DE OXIGÊNIO (DQO)

Na análise da série temporal realizada (Figura 18), observou-se que a eficiência de remoção de DQO manteve-se acima de 60% nos quatro primeiros meses do tratamento e atingindo valores próximos a 94% em março/2025. O resultado de uma alta eficiência indica um período de menor carga gerada e reflete a alta capacidade de degradação da matéria orgânica da lagoa facultativa, como observado nos valores de remoção de DBO no mesmo mês. Além disso, a estabilização do pH na faixa ótima (7,2 e 8,5) discutida anteriormente, assegura a integridade dos microrganismos presente, sendo essas, a principal agente responsável pela

degradação da DQO, favorecendo o processamento efetivo da carga orgânica no efluente (FIDELE; MBUNGU; NZUZI, 2022; VON SPERLING, 2002).

Figura 18 – Variação temporal da eficiência de remoção da DQO na lagoa facultativa durante o monitoramento da fitorremediação com as três espécies de macrófitas aquáticas.



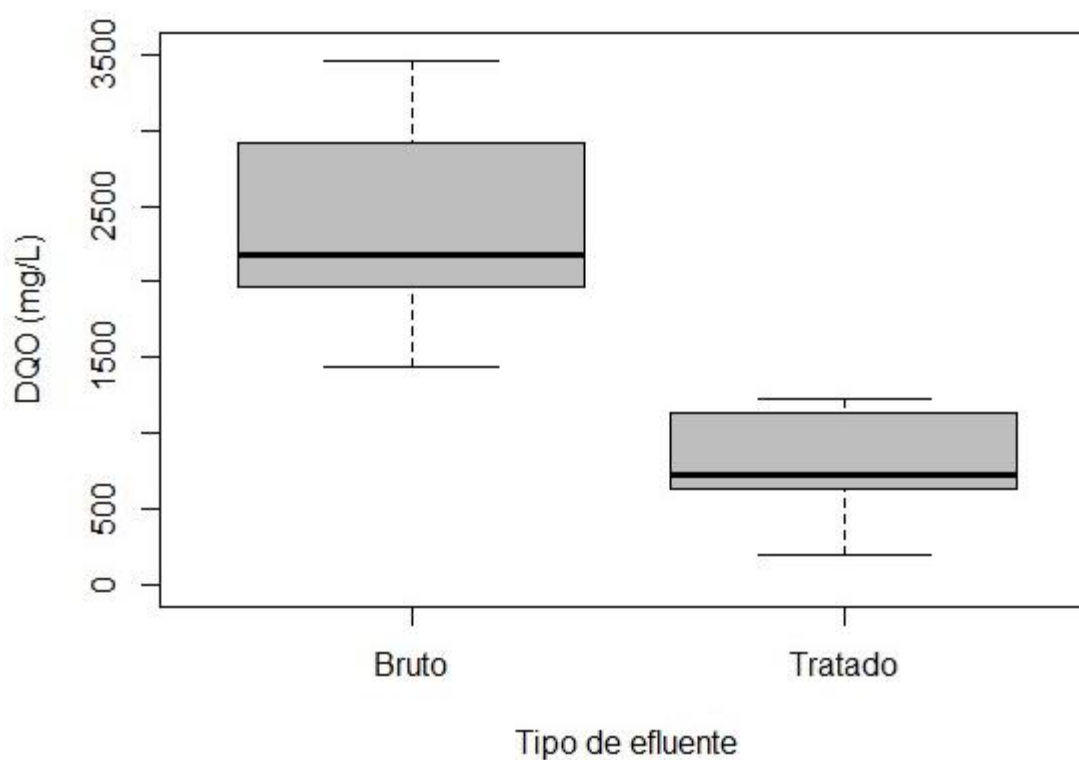
Fonte: Autoria própria, 2025.

Nos últimos meses de monitoramento, foi perceptível a queda significativa na eficiência de redução, chegando até em 35,4% no mês de agosto/2025. Os resultados obtidos podem estar atribuídos as mesmas influências citadas anteriormente, como também, à persistência de matéria orgânica não-biodegradável, em que a remoção é tipicamente menos eficiente em lagoas facultativas, mesmo com contribuições (ALESSANDRO et al., 2014; VON SPERLING, 1996).

Com validação estatística realizada, os resultados obtidos para a DQO demonstram uma diferença expressiva entre o efluente bruto e o tratado na lagoa facultativa após o tratamento. O teste de normalidade de Shapiro Wilk indicou uma distribuição normal dos dados ($p = 0,4264$), o que validou o uso de testes paramétricos. A aplicação do Teste T pareado confirmou a diferença estatisticamente significativa entre as médias dos valores de DQO antes e após o tratamento ($p = 0,001144$), demonstrando que o sistema é efetivo na redução da matéria orgânica. Foi

observado uma concentração média de $801,4 \text{ mg.L}^{-1}$ e uma redução da mediana para $719,9 \text{ mg.L}^{-1}$. A amplitude dos dados, variou de $203,4$ a $1224,9 \text{ mg.L}^{-1}$, associada a um desvio padrão elevado ($347,94 \text{ mg.L}^{-1}$), evidencia a alta variabilidade da carga afluyente durante o período analisado, conforme apresentado na Figura 19. Essa flutuação pode-se ainda, estar atribuída as variações de contribuições de matéria orgânica no sistema.

Figura 19 - Gráfico da distribuição geral dos valores de DQO na entrada da lagoa facultativa antes do sistema de fitorremediação e na saída da lagoa após o sistema de fitorremediação (p-value = 0,001144).



Fonte: Autoria própria, 2025

5.1.5. PARÂMETROS COM AMOSTRAGEM ESPARSA

Conforme abordado na metodologia do estudo, os meses em que as espécies de macrófitas apresentaram maior desenvolvimento, com alta densidade de cobertura vegetal e estágio de desenvolvimento avançado, especificamente nos meses de novembro de 2024 e fevereiro de 2025, foi possível realizamos a análise dos parâmetros fósforo total e nitrogênio amoniacal total na saída da lagoa facultativa após o tratamento com a fitorremediação, com seus

valores apresentados na Tabela 5. É importante reforçar ainda que, apesar de não ser possível verificar a eficiência de remoção dos parâmetros mediante a amostragem limitada, os dados obtidos são passíveis de comparação direta ao considerar ambos os períodos.

Tabela 5 - Valores do monitoramento pontual dos parâmetros fósforo total e nitrogênio amoniacal total na saída da lagoa facultativa.

Parâmetro	Período	Valor encontrado	Unidade
		Saida	
Fósforo Total	Nov/24	0,079	mg.L ⁻¹
	Fev/2025	0,01	
Nitrogênio Amoniacal Total	Nov/24	1,98	
	Fev/2025	10,45	

Fonte: Elaborado pela autora (2025) com base nos relatórios analíticos da Hidrolabor.

O fósforo total apresentou uma redução acentuada de 87,3% em sua concentração no segundo mês de coleta, ao oscilar de 0,079 mg/L para 0,01 mg/L. Esse período como citado acima, correspondeu com a fase de maior estágio fonológico e adequação das macrófitas na zona de fitorremediação, essa observação, apresenta um bom indicativo da capacidade de assimilação do parâmetro pelas espécies e microrganismos associados às raízes das plantas, além de possíveis processos de precipitação e adsorção no sedimento, comuns nesse tipo de sistema de tratamento (ANDRADE; TAVARES; MAHLER, 2007; ESTEVES, 2011).

Valores próximos a essas concentrações também foram encontrados por Sousa (2015) em seu estudo de biorremediação em lagoa facultativa em uma estação de tratamento de Mangabeira - PB, com o uso da macrófita *Pontederia crassipes* Mart.

Por outro lado, o nitrogênio amoniacal total aumentou de 1,98 mg.L⁻¹ para 10,45 mg.L⁻¹ no mesmo intervalo. Esse comportamento pode estar associado à intensificação da formação da matéria orgânica e à liberação de amônia a partir da degradação de biomassa vegetal em fase de senescência, típica de períodos em que a comunidade de macrófitas atinge maturidade (BITAR, 1998). Além disso, em ambientes com menor aeração e pH entre 8,5 e 9,5, pode ocasionar a limitação dos processos de nitrificação, favorecendo o acúmulo de amônia (VON SPERLING, 1996).

5.2. CONFORMIDADE DO EFLUENTE TRATADO COM A LEGISLAÇÃO VIGENTE

O efluente gerado pela indústria deve atender aos padrões de lançamento estabelecidos de acordo com a Resolução CONAMA 430/2011 e as normas estabelecidas pelo Estado de São Paulo para a prevenção e o controle da poluição do meio ambiente, conforme o Decreto Estadual nº 8.468/76. Assim, avalia-se a conformidade dos parâmetros físico-químicos de acordo com a ordem de prioridade, o qual corresponde a norma mais restritiva.

Nesse contexto, de acordo com os resultados analisados anteriormente, apesar das concentrações de DBO estarem acima do limite máximo (60 mg.L^{-1}) estabelecido pelo Decreto Estadual nº 8.468/76, o sistema atingiu os níveis de conformidade esperado, visto que quando a concentração do efluente é superior ao limite máximo estipulado, deve-se atingir uma remoção mínima de 80%. Dessa forma, em todo o período de monitoramento a eficiência de remoção alcançada no sistema foi superior ao mínimo exigido, mantendo uma média de eficiência em 89,5%, o parâmetro segue em conformidade.

O pH também apresentou valores em conformidade com a legislação, conforme foi observado na Figura 13, em que todo o período de monitoramento manteve-se na faixa exigida 5 a 9. No caso do OD, como mencionado anteriormente, os resultados apresentados não se referem ao ponto de lançamento no corpo hídrico receptor. Com isso, torna-se possível compreender que embora os valores estejam abaixo de $2,0 \text{ mg.L}^{-1}$, esse parâmetro não pode ser diretamente comparado à exigência legal estabelecida para o lançamento.

5.3. LIMITAÇÕES OBSERVADAS NO ESTUDO

As conclusões desta monografia devem ser analisadas à luz de suas limitações, que, por outro lado, apontam caminhos para novas investigações na temática do estudo. As principais limitações observadas foram:

(I) A frequência adotada para as análises de monitoramento pode representar uma limitação quanto à sensibilidade e precisão dos resultados, uma vez que intervalos mais espaçados não permitem observar variações sutis ou pontuais na carga orgânica afluyente, tampouco na resposta imediata do sistema de tratamento.

(II) Durante o período de monitoramento, duas delimitações instaladas com telas na lagoa facultativa sofreram rompimentos em duas ocasiões distintas, ocasionados por interferências de fauna silvestre. Por questões de segurança operacional, a entrada de colaboradores com

embarcações no interior da lagoa foi temporariamente proibida, impossibilitando a manutenção imediata dessas estruturas e resultando em um tempo considerável até o restabelecimento das áreas afetadas.

(III) Após a reestruturação das delimitações, novas mudas de *Pontederia crassipes* Mart. (aguapé) foram inseridas nas zonas de fitorremediação; contudo, o desenvolvimento dessas plantas não ocorreu conforme o planejado, possivelmente em decorrência das condições físicas e operacionais momentâneas do sistema.

(IV) Com o intuito de evitar a redução do volume da lagoa, foi determinada a manutenção de apenas uma comporta aberta nas áreas de fitorremediação. Tal medida, embora necessária, impossibilitou a avaliação individual do desempenho e da contribuição específica de cada espécie de macrófita no processo de tratamento.

(V) Por fim, o sistema de flutuadores utilizado para o cultivo das espécies *Canna x generalis* (beri-silvestre) e *Cyperus alternifolius* L (sombriinha-chinesa) demonstrou eficiência e potencial como alternativa de suporte, porém requer manutenção frequente e apresenta limitações quanto à expansão natural da cobertura vegetal ao longo do tempo.

5.4. TRABALHOS FUTUROS

Diante das limitações identificadas e dos dados analisados, a continuidade dos estudos para aprimoramento das ações idealizadas no Projeto Gênesis, visando o aperfeiçoamento gradual do sistema de tratamento por lagoa facultativa com fitorremediação são fundamentais.

Recomenda-se que os próximos ciclos de monitoramento incluam campanhas de amostragem mais frequentes aos parâmetros considerados foco e contínuas, com ênfase nos parâmetros adicionais como fósforo total, nitrogênio amoniacal, nitrito, nitrato e sólidos suspensos, de modo a captar variações sazonais e respostas pontuais do sistema a alterações ambientais ou operacionais. Essa abordagem contribuirá para a construção de um diagnóstico mais sensível da eficiência do processo e permitirá o ajuste de estratégias de manejo das macrófitas, otimizando o desempenho da fitorremediação.

A reavaliação periódica das estruturas físicas e o aprimoramento das técnicas de flutuação e estabilização das espécies de macrófitas aquáticas emergentes também são fundamentais para garantir a manutenção da integridade das zonas de fitorremediação e a expansão controlada da biomassa.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo teve como objetivo investigar a viabilidade da fitorremediação com macrófitas aquáticas em lagoa facultativa na área da Industria Savencia Brasil, unidade de Angatuba/SP, bem como, a eficiência na remoção de carga orgânica e melhorias na qualidade do efluente gerado. Os resultados obtidos ao longo do estudo demonstraram que o sistema de tratamento por lagoa facultativa associado à fitorremediação apresentou eficiência satisfatória na melhoria dos parâmetros de qualidade do efluente, especialmente nos aspectos de redução das cargas orgânicas expressas por DBO (89,5%).

As variações nos teores de oxigênio dissolvido e pH refletiram na influência direta da atividade fotossintética e do metabolismo microbiano, o que indicou um equilíbrio funcional entre os processos aeróbios e anaeróbios que caracterizam esse tipo de sistema. Embora alguns parâmetros tenham apresentado oscilações sazonais e outros resultados pontuais, o desempenho geral evidencia o potencial de tratamento biológico em promover a estabilização do efluente, de modo a garantir sua conformidade com a legislação e minimizar seus impactos sobre o corpo receptor.

Mesmo sem a possibilidade de avaliar individualmente o desempenho de cada espécie vegetal, constatou-se que as macrófitas *Pontederia crassipes* Mart., *Canna x generalis* e *Cyperus alternifolius* L. apresentaram excelente adaptação às características do efluente provenientes de indústria de queijos processados, com crescimento notável já nas primeiras semanas de implementação, especialmente no caso do aguapé. O sistema radicular bem desenvolvido e a elevada capacidade de colonização dessas macrófitas aquáticas favoreceram o aprimoramento dos processos de tratamento na lagoa facultativa, atuando desde a remoção e redução dos parâmetros-fisioquímicos, assim como na absorção e assimilação de nutrientes.

Por fim, ressalta-se que a continuidade e o aprimoramento das ações do Projeto Gênesis são fundamentais para consolidar a eficiência e a sustentabilidade do sistema abordado, assegurando a qualidade do efluente tratado, o atendimento às normas ambientais e promovendo benefícios diretos à comunidade local e ao equilíbrio ecológico da região. A consolidação da fitorremediação com macrófitas aquáticas como modelo de processo biológico na indústria, representa um avanço significativo na gestão ambiental e na valorização de tecnologias sustentáveis aplicadas ao saneamento.

REFERÊNCIAS

APHA; AWWA; WEF. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 24. ed. Washington, D.C.: American Public Health Association, 2017.

ALESSANDRO, E. B. et al. Dinâmica e sazonalidade das variáveis físico-químicas e biológicas de uma lagoa facultativa. **REEC-Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 9, n. 2, 2014. Disponível em: <https://revistas.ufg.br/reec/article/view/29447/17605>. Acesso em: 10 out. 2024.

AMOY, W. C. **Tratamento do efluente gerado nas indústrias de laticínio: uma revisão de literatura sobre as tecnologias empregadas**. 2023. 49 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória, 2023. Disponíveis em: https://repositorio.ifes.edu.br/bitstream/handle/123456789/4074/TCC_Tratamento_Efluente_Gerado_Ind%3%bastrias_Latic%3%adnio.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 10 out. 2024.

ANDRADE, R. G. et.al. **Evolução recente da produção e da produtividade leiteira no Brasil**. Revista Foco, Curitiba (PR), v. 16, n. 5, e1888, p. 1-12, 2023. DOI: 10.54751/revistafoco.v16n5-075. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/doc/1154296/1/Evolucao-recente-da-producao-e-da-produtividade-leiteira-no-Brasil.pdf>. Acesso em: 10 out. 2024.

ANDRADE, J. C.; TAVARES, S.; MAHLER, C. **Fitorremediação: o uso de plantas na melhoria da qualidade ambiental**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. E-book. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 12 jul. 2025.

BARBOSA, L. M. et al. **Lista de espécies indicadas para restauração ecológica para diversas regiões do estado de São Paulo**. São Paulo: Instituto de Botânica, 2017. 344 p. Disponível em: <https://repositorio.cetesb.sp.gov.br/handle/123456789/3099>. Acesso em: 10 out. 2024.

BARRETO, A. B. **A seleção de macrófitas aquáticas com potencial para remoção de metais-traço em fitorremediação**. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte, 2011. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/BUBD-92UJVB>. Acesso em: 12 jul. 2025.

BEZERRA, L. C. **Fitorremediação para tratamento de água residuária utilizando alface (*Lactuca sativa*) e aguapé (*Eichhornia crassipes*)**. 2019. 49 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/25093/1/FITORREMEDIA%3%87%3%83O%20PARA%20TRATAMENTO%20DE%20%3%81GUA%20RESIDU%3%81RIA%20UTILIZANDO%20ALFACE%20%28Lactuca%20sativa%29%20E%20AGUAP%3%89%20%28E.pdf>. Acesso em: 12 jul. 2025.

BITAR, A. L. **Fluxo de nitrogênio e seu uso por duas macrófitas aquáticas (*Eichhornia crassipes* e *Pistia stratiotes*), no reservatório de Salto Grande (Americana-SP)**. 1998.

Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 1998. doi:10.11606/D.18.1998.tde-20062024-161507. Acesso em: 24 jul. 2025.

BORGES, A. R.; ARAÚJO, S. Fitorremediação como tecnologia sustentável no tratamento de efluentes industriais. **Revista de Tecnologia & Gestão Sustentável**, v. 2, n. 6, p. 138, 2023. Disponível em: Fitorremediação como tecnologia sustentável no tratamento de efluentes industriais | Revista de Tecnologia & Gestão Sustentável. Acesso em: 12 jul. 2025.

BORTOLI, K. **Estudo de caso: utilização de reprocesso como matéria prima em uma empresa de queijos processados**. 2022. Dissertação (Mestrado em Tecnologias em Biociências) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, 2022. Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/12474/3/LD_COALM_2014_2_03.pdf. Acesso em: 20 maio 2025.

BRASIL, Resolução Conama nº 357. Março de 2005. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/?id=450&option=com_sisconama&task=arquivo.download.

BRASIL, Resolução Conama nº 430. Maio de 2011. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=114770>

BRITO, L. D. **Potencial de uso de macrófitas e biofilme como ferramenta de biorremediação na lagoa facultativa da estação de tratamento de esgoto de Mamanguape-PB**. 2021. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências Exatas e da Natureza, João Pessoa. Disponível em: https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/23369?locale=pt_BR. Acesso em: 18 maio 2024.

CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Guia Técnico Ambiental da Indústria de Produtos Lácteos – Série P+L**. São Paulo, 2006. 89p. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/consumosustentavel/wp-content/uploads/sites/20/2013/11/laticinio.pdf>. Acesso em: 18 nov. 2024.

CICHELLO, G. C. V.; RIBEIRO, R.; TOMMASO, G. Caracterização e Cinética do Tratamento Anaeróbio de Efluentes de Laticínios. **UNOPAR Cient Ciênc Biol Saúde**, v. 15, n. 1, p. 27-40, 2015. doi: 10.5216/biociencias.v15i1.1015. Disponível em: <https://www.seer.unopar.br/index.php/biociencias/article/view/1015>. Acesso em: 18 nov. 2024.

COSTA, D. C. **Caracterização e tratamento de efluentes resultantes da atividade de produção de queijo**. 2011. Tese de Doutorado. Faculdade de Ciências e Tecnologia. Disponível em: https://run.unl.pt/bitstream/10362/5661/1/Costa_2011.pdf. Acesso em: 18 nov. 2024.

DAS, Pragyan; PAUL, Kakoli Karar. Hydroponic rhizofiltration of dairy wastewater by *Coleus Scutellarioides* & *Portulaca Oleracea*. **Journal of Water Process Engineering**, v. 52, p. 103589, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1944398624003977>. Aceso em: 24 jul. 2025.

ESTEVEES, F. A. **Fundamentos de limnologia**. 1. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2011. *E-book*. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em:

FIDELE, M. K.; MBUNGU, D. M.; NZUZI, L. M. **Eficiência das tábua larga (typha latifolia) e palmeira umbela (cyperus alternifolius) no tratamento de águas residuais por leitões de macrófitas no Campus Universitário Kimpa Vita**. 2022. ALBA -ISFIC Research and Science Journal, 1(2), pp. 141-153. Disponível em: <https://alba.ac.mz/index.php/alba/article/view/54/43>. Acesso em: 26 ago. 2025.

FIEMG (Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais); FEAM (Fundação Estadual do Meio Ambiente); SILEMG (Sindicato da Indústria de Laticínios de Minas Gerais). **Guia Técnico Ambiental da Indústria de Laticínios**. Belo Horizonte: Sistema FIEMG, 2014. 70 p. Disponível em: <https://pnla.mma.gov.br/publicacoes-diversas?search=Latic%C3%ADnios>. Acesso em: 18 nov. 2024.

GONÇALVES, B. Z. **Tratamento de efluente de laticínio em reator de leite estruturado aeróbio**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina. 2017. Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/12045/2/LD_COEAM_2017_1_04.pdf. Acesso em: 18 nov. 2024.

HENARES, J. F. **Caracterização do Efluente de Laticínio: análise e proposta de tratamento**. 2015. 51 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Alimentos) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2015. Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/6641/2/CM_COEAL_2015_1_06.pdf. Acesso em: 10 out. 2024.

LAMEGO, F. P.; VIDAL, R. A. Fitorremediação: Plantas Como Agentes De Despoluição?. **Pesticidas: Revista de Ecotoxicologia e Meio Ambiente**, [S. l.], v. 17, 2007. DOI: 10.5380/pes.v17i0.10662. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/pesticidas/article/view/10662>. Acesso em: 26 jul. 2025.

LEITE, A. I. N. et al. Caracterização dos resíduos sólidos gerados em laticínios. **Revista do Instituto de Laticínios Cândido Tostes**, [S.l.], v. 73, n. 2, p. 73-81, nov. 2018. ISSN 2238-6416. doi: <https://doi.org/10.14295/2238-6416.v73i2.672>. Disponível em: <https://www.revistadoilct.com.br/rilct/article/view/672/469>. Acesso em: 26 ago. 2025.

RIBEIRO, M. E. et al. Fitorremediação De Águas Residuais Com Aguapé Do Gênero Eichhornia: Uma Revisão Sistemática. **ARACÊ**, v. 7, n. 5, p. 21810-21825, 2025. Disponível em: <https://periodicos.newsciencepubl.com/arace/article/view/4838/6773>. Acesso em:

MAHMOUDI, Amal et al. Performances of constructed wetland system to treat whey and dairy wastewater during a macrophytes life cycle. **Desalination and Water Treatment** , v. 318, p. 100364, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1944398624003977>. Aceso em: 24 jul. 2025.

MONTOYA, J. I. et al. Estudio comparativo de la remoción de materia orgánica en humedales construidos de flujo horizontal subsuperficial usando três espécies de macrófitas. **Revista**

- EIA, Medellín**, v. 7, n. 14, p. 75-84, dez. 2010. Disponível em: <http://www.scielo.org.co/pdf/eia/n14/n14a07.pdf>. Acesso em: 24 jul. 2025.
- NEMEROW, N. L.; AGARDY, F. J.; SULLIVAN, P. J.; SALVATO, J. A. **Environmental Engineering: Water, Wastewater, Soil and Groundwater Treatment and Remediation**. 6th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2009. 24 jul. 2025.
- POLENGHI. **Institucional**. Disponível em: <https://www.polenghi.com.br/>. Acesso em: 10 out. 2024.
- POMPÊO, M. **Monitoramento e manejo de macrófitas aquáticas em reservatórios tropicais brasileiros**. São Paulo: Instituto de Biociências da USP, 2017. 16 - 32 p.: il. Disponível em: https://ecologia.ib.usp.br/portal/macrophytas/all_book.pdf. Acesso em: 24 jul. 2025.
- SÃO PAULO (Estado). Decreto nº 8.468, de 8 de setembro de 1976. **Regulamenta a 45 Lei nº 997, de 31 de maio de 1976, que dispõe sobre a prevenção e o controle da poluição do meio ambiente**. Diário Oficial do Estado de São Paulo, São Paulo, SP, 9 set. 1976. Disponível em: decreto n.8.468, de 08.09.1976. Acesso em: 20 maio 2025.
- SANTOS, N.; SILVA, L. H.; SANTOS, A. M. Tratamento de efluentes líquidos na indústria de laticínios: uma revisão. **Revista do Instituto de Laticínios Cândido Tostes**, Juiz de Fora, v. 77, n. 3, p. 168-176, jul./set. 2022. DOI: 10.14295/2238-6416.v77i3.889. Disponível em: <https://www.revistadoilct.com.br/rilct/article/view/889>. Acesso em: 15 mai. 2025.
- SOUSA, C. E. **Avaliação de sistemas biorremediadores em efluentes da lagoa facultativa da estação de tratamentos de esgotos em Mangabeira, João Pessoa/PB**. 2015. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências Exatas e da Natureza, João Pessoa. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/11586/1/Arquivototal.pdf>. Acesso em: 26 ago. 2025.
- SOUZA, G. B.; et al. Análise das etapas de produção e tratamento de efluentes das indústrias de laticínios. In: **AGRONEGÓCIO E SUSTENTABILIDADE: MÉTODOS, TÉCNICAS, INOVAÇÃO E GESTÃO**. 1. ed. [S. l.], 2021. p. 106–128. Disponível em: <https://doi.org/10.37885/211206868>. Acesso em: 20 mai. 2025.
- TRAN, H. D. et al. Pollutant removal by *Canna Generalis* in tropical constructed wetlands for domestic wastewater treatment. **Global Journal of Environmental Science and Management**, [S. l.], v. 5, n. 3, p. 331-344, Summer 2019. Disponível em: <https://www.gjesm.net/>. Acesso em: 26 ago. 2025.
- TRAVERSI, D.; et al. Environmental Advances Due to the Integration of Food Industries and Anaerobic Digestion for Biogas Production: Perspectives of the Italian Milk and Dairy Product Sector. **Bioenergy Research**, v. 6, p. 851–863, 2013. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/Environmental-Advances-Due-to-the-Integration-of-of-Traversi-Bonetta/03ed05ea382e9f069189dee280380609f6f4291a>. Acesso em: 26 ago. 2025.

VON SPERLING, M. **Introdução da qualidade das águas e ao tratamento de esgoto.** vol. 2. 2. Ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, Belo Horizonte, 1996.

VON SPERLING, M. **Princípios básicos do tratamento biológico de águas residuárias: Lagoas de estabilização.** Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais - DESA-UFMG, 2002. v. 3.