

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
ESCOLA DE QUÍMICA

Paula André da Silva



AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA (ACV) DE BIOFERTILIZANTE PRODUZIDO A PARTIR
DE *ARTHROSPIRA SP.* CULTIVADA EM EFLUENTE DE CERVEJARIA

RIO DE JANEIRO

2024

Paula André da Silva

Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) de Biofertilizante Produzido a partir de *Arthrospira sp.*
Cultivada em Efluente de Cervejaria

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheira de Bioprocessos.

Orientador(es): Anita Ferreira Do Valle

Bettina Susanne Hoffmann

Jenny Sayaka Komatsu

Rio de Janeiro

2024

CIP - Catalogação na Publicação

S586a Silva, Paula André
Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) de
Biofertilizante Produzido a partir de Arthrospira
sp. Cultivada em Efluente de Cervejaria / Paula
André Silva. -- Rio de Janeiro, 2024.
84 f.

Orientador: Anita Ferreira Valle.
Coorientador: Bettina Susanne Hoffmann.
Trabalho de conclusão de curso (graduação) -
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de
Química, Bacharel em Engenharia de Bioprocessos,
2024.

1. avaliação de ciclo de vida. 2.
biofertilizante. 3. pegada de carbono. 4.
Arthrospira sp. 5. economia circular. I. Valle,
Anita Ferreira , orient. II. Hoffmann, Bettina
Susanne , coorient. III. Título.

Paula André da Silva

Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) de Biofertilizante Produzido a partir de *Arthrospira sp.*
Cultivada em Efluente de Cervejaria

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola de Química da Universidade Federal do
Rio de Janeiro, como parte dos requisitos
necessários à obtenção do grau de Engenheira de
Bioprocessos.

Aprovado em 19 de dezembro de 2024.

Anita Ferreira do Valle, Doutora em Ciências, Instituto de Química - UFRJ

Bettina Susanne Hoffmann, Doutora em Planejamento Energético, Escola de Química - UFRJ

Jenny Sayaka Komatsu, Doutora em Ciência e Tecnologia Química, Seijun Inovação e
Sustentabilidade Ltda

Danielle Maria Perpétua de Oliveira Santos, Doutora em Ciências, Instituto de Química -
UFRJ

Jose Angel Ramon Hernandez, Doutor em Ciências Químicas, Escola de Química - UFRJ

Marcelo Mendes Viana, Doutorado em Engenharia Química, Escola de Química – UFRJ
Rio de Janeiro

2024

À menina que realizou seu sonho.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todos que tiveram comigo nessa etapa da minha vida, em especial a aqueles que viveram junto comigo de perto.

Agradeço aos meus amigos do laboratório LBB Algas pelo comprometimento e amizade durante os projetos. Ao meu Eduardo que iniciou a sua jornada junto comigo na UFRJ e sempre esteve comigo nos momentos difíceis.

Agradeço aos amigos do coração Israel, Thais, Bianca, Will e Godoy, assim como os que fiz nessa jornada, em especial ao Felipe, Jéssica, Murilo, Alana e Flávia.

Agradeço às minhas orientadoras Anita, Susanne e Jenny por todo o suporte, amizade e profissionalismo que permitiram uma troca muito positiva, assim como apoio para a construção de cada etapa do trabalho e me auxiliaram e acreditaram na minha jornada profissional.

Agradeço aos meus sogros Cássia e Alexandre suporte em etapas difíceis, o carinho e o apoio. Agradeço também ao meu cunhado Rubens pelo carinho e amizade.

Agradeço por toda a família André pelo carinho e incentivo, em especial a minha avó Carmem e ao meu falecido avô André que sempre me incentivaram a estudar.

Agradeço a minha mãe Cláudia e irmã Paola pelo suporte ao longo de anos, apoio e incentivo para o meu crescimento profissional, assim como todo o amor.

Agradeço à minha noiva, Julia, pelo apoio, admiração, suporte e amor, principalmente nessa reta de finalização de curso. Sou imensamente grata por tê-la ao meu lado. Muito obrigada por me ajudar e tornar a minha vida mais leve. Seu amor foi essencial para eu conseguir finalizar esta etapa.

Não fazemos nada sozinhos, por isso um agradecimento especial aos mencionados, vocês foram essenciais nessa minha jornada.

RESUMO

Silva, Paula André. **Avaliação de Ciclo de Vida de Biofertilizante Produzido a partir de *Arthrospira* sp. Cultivada em Efluente de Cervejaria**. Rio de Janeiro, 2024. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia de Bioprocessos- Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

A mitigação das mudanças climáticas demanda soluções que reduzam as emissões de gases de efeito estufa (GEE), especialmente no setor agropecuário, responsável pela maior parte das emissões no Brasil. Os fertilizantes químicos sintéticos, amplamente utilizados na agricultura, contribuem significativamente para essas emissões devido aos processos intensivos de produção, transporte e uso. Diante desse cenário, é essencial investir em alternativas mais sustentáveis, que minimizem os impactos ambientais e promovam uma economia circular. Este trabalho tem como objetivo quantificar e comparar o impacto ambiental relacionado às mudanças climáticas pela substituição de fertilizantes sintéticos importados pelo Brasil pelo biofertilizante produzido nacionalmente a partir do cultivo de *Arthrospira* sp. em efluentes de cervejaria. O efluente bruto, sem pré-tratamento, proveniente do processo cervejeiro, foi utilizado como meio de cultivo na produção do biofertilizante, que posteriormente foi aplicado no cultivo de cevada destinada à fabricação de cerveja, adotando o conceito de Economia Circular. A análise realizada foi a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), utilizada para quantificar as emissões de gases de efeito estufa (GEE) nos processos produtivos e de transporte do biofertilizante e do fertilizante químico NPK (5-20-20), comumente empregado no cultivo de cevada. Os resultados da ACV demonstraram uma redução de 2,7 vezes no impacto de aquecimento global com o biofertilizante, com emissões de 485,84 kg de CO₂-eq por tonelada, em comparação a 1312,75 kg de CO₂-eq por tonelada de NPK. Além disso, uma análise de sensibilidade foi realizada para cenários de substituição de fertilizantes nas proporções de 50% e 75%, evidenciando reduções de emissões de 1,46 e 1,89 vezes, respectivamente. Esses resultados indicam que mesmo substituições parciais beneficiam o meio ambiente, reduzindo significativamente as emissões associadas. Em geral, a substituição do fertilizante químico NPK pelo biofertilizante representa uma alternativa mais sustentável à prática convencional de fertilização no Brasil, contribuindo para a redução da pegada de carbono associada à produção e transporte desses insumos. Essa mudança promove uma agricultura com menor impacto ambiental ao diminuir a dependência de fertilizantes importados e incorporar os princípios da Economia Circular à cadeia produtiva da cerveja, fortalecendo a sustentabilidade no setor agrícola e industrial.

Palavras-chave: avaliação de ciclo de vida; biofertilizante; pegada de carbono; *Arthrospira* sp.; economia circular.

ABSTRACT

Silva, Paula André. **Avaliação de Ciclo de Vida de Biofertilizante Produzido a partir de *Arthrospira* sp. Cultivada em Efluente de Cervejaria**. Rio de Janeiro, 2024. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia de Bioprocessos - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

The mitigation of climate change requires solutions that reduce greenhouse gas (GHG) emissions, especially in the agricultural sector, which accounts for the majority of emissions in Brazil. Synthetic chemical fertilizers, widely used in agriculture, significantly contribute to these emissions due to the intensive processes of production, transportation, and use. In this context, it is essential to invest in more sustainable alternatives that minimize environmental impacts and promote a circular economy. This study aims to quantify and compare the environmental impact of climate change by replacing synthetic fertilizers imported by Brazil with biofertilizer produced domestically from the cultivation of *Arthrospira* sp. in brewery effluents. The raw, untreated effluent from the brewing process was used as a growth medium for the production of biofertilizer, which was subsequently applied to barley cultivation for beer production, adopting the concept of circular economy. The analysis was conducted using Life Cycle Assessment (LCA) to quantify GHG emissions in the production and transportation processes of the biofertilizer and the synthetic NPK (5-20-20) fertilizer commonly used in barley cultivation. The LCA results showed a 2.7-fold reduction in global warming impact for the biofertilizer, with emissions of 485.84 kg CO₂-eq per ton compared to 1312.75 kg CO₂-eq per ton for NPK. Additionally, a sensitivity analysis was performed for fertilizer substitution scenarios at proportions of 50% and 75%, showing emissions reductions of 1.46 and 1.89 times, respectively. These results indicate that even partial substitutions benefit the environment by significantly reducing associated emissions. Overall, replacing synthetic NPK fertilizer with biofertilizer represents a more sustainable alternative to conventional fertilization practices in Brazil, reducing the carbon footprint related to production and transportation. This shift promotes agriculture with lower environmental impact, reduces dependence on imported fertilizers, and integrates circular economy principles into the beer production chain, strengthening sustainability in the agricultural and industrial sectors.

Keywords: Life Cycle Assessment; biofertilizer; carbon footprint; *Arthrospira* sp.; circular economy;

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1** - Economia Circular na indústria cervejeira.
- Figura 2** - Compostos produzidos pelas microalgas.
- Figura 3** - Microalgas cultivadas em *raceway ponds*.
- Figura 4** - Foto representativa de *Arthrospira sp.*
- Figura 5** - Maiores consumidores de Fertilizantes (mi t).
- Figura 6** - Evolução da Produção Nacional e Importações de Fertilizantes (1996-2022).
- Figura 7** - A dependência externa por Fertilizantes.
- Figura 8** - Rota de Produção de Fertilizantes Nitrogenados.
- Figura 9** - Principais produtores de nitrogenados.
- Figura 10** - Principais locais de origem de fertilizantes nitrogenados em 2018.
- Figura 11** - Rota de Produção dos Principais Fertilizantes Fosfatados Produzidos no Brasil.
- Figura 12** - Principais locais de origem de fertilizantes fosfatados em 2018.
- Figura 13** - Principais origens de Cloreto de Potássio para o Brasil.
- Figura 14** - Esquema explicativo sobre a produção de fertilizantes.
- Figura 15** - Ciclo de vida do produto.
- Figura 16** - Natureza iterativa da ACV.
- Figura 17** - Categorias de impacto nas estruturas midpoint e endpoint.
- Figura 18** - Estrutura de Avaliação do Ciclo de Vida.
- Figura 19** - Avaliação do Ciclo de Vida.
- Figura 20** - Cultivo de *Arthrospira sp.* e secagem da biomassa.
- Figura 21** - Região de Passo Fundo, RS.
- Figura 22** - Fluxograma da modelagem de produção e transporte do biofertilizante.
- Figura 23** - Distribuição das contribuições do fertilizante NPK no software openLCA.
- Figura 24** - Informações gerais da produção e transporte do fertilizante nitrogenado.
- Figura 25** - Principais origens de fosfatados para o Brasil.
- Figura 26** - Informações gerais da produção e transporte dos fertilizantes fosfatados.
- Figura 27** - Informações gerais da produção e transporte dos fertilizantes potássicos.
- Figura 28** - Informações gerais da produção e transporte da dolomita.
- Figura 29** - Contribution tree do sistema de produto da produção e transporte do biofertilizante feito com 100% de biomassa para o campo de cevada.

Figura 30 – Contribution tree do sistema de produto da produção e transporte de fertilizante 100% NPK para o campo de cevada.

Figura 31 – Diagrama de Sankey do sistema de produto da produção e transporte do biofertilizante feito com 100% de biomassa para o campo de cevada.

Figura 32 – Diagrama de Sankey do sistema de produto da produção e transporte de fertilizante 100% NPK para o campo de cevada.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características dos efluentes de cervejaria.

Tabela 2 – Comparação genérica entre sistema aeróbio e aeróbio no tratamento de águas residuárias.

Tabela 3 – Contribuição dos estados brasileiros na produção de Dolomita.

Tabela 4 – Análise de sensibilidade entre a substituição dos fertilizantes.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACV – Avaliação de Ciclo de Vida

DAP – Fosfato diamônico

ECOCIS – Laboratório de Estudos de Ecologia de Cianobactérias

ETE – Estação de Tratamento de Efluentes

GEE – Gases de Efeito Estufa

GHG – Greenhouse Gases

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change

ISO – International Organization for Standardization

LEAF – Laboratório de Estudos Aplicados à Fotossíntese

MAP – Fosfato monoamônico

NPK – Fertilizantes químicos compostos por Nitrogênio, Fósforo e Potássio

PNF – Plano Nacional de Fertilizantes

RoW – Rest-of-the-World

SSP – Superfosfato simples

TSP – Superfosfato triplo

UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro

UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change

LISTA DE SÍMBOLOS

$\text{CO}_{2\text{eq}}$	Dióxido de Carbono Equivalente
N	Nitrogênio
P	Fósforo
K	Potássio
P_2O_5	Pentóxido de Fósforo
K_2O	Óxido de Potássio
KCl	Cloreto de potássio
N_2O	Óxido Nitroso
NH_3	Amônia
CO_2	Dióxido de Carbono
H_2O	Água
CH_4	Metano
HCO_3^-	Bicarbonato de Sódio
NaCl	Cloreto de Sódio
NH_4^+	Íon Amônio
SO_4^{2-}	Íon Sulfato
NO_3^-	Íon Nitrato
pH	Potencial Hidrogeniônico
GEE	Gases de Efeito Estufa
$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	Dolomita
$\mu\text{mol photons/m}^2/\text{s}$	Micromols de fótons por metro quadrado por segundo
Kg	Quilograma
$\text{g/m}^2/\text{dia}$	Gramas por metro quadrado por dia
Wh	Watt-hora

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	14
1.2 OBJETIVOS	16
1.2.1 Objetivo Geral	16
1.2.2 Objetivos Específicos	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 Poluição pelos Efluentes Industriais	17
2.1.1 Efluentes da Indústria de Cervejaria	17
2.2 Tratamento de Efluentes de Cervejaria	19
2.3 Microalgas	21
2.3.1. <i>Arthrospira</i> sp.	24
2.3.2. Aplicações como Biofertilizante	26
2.4. Fertilizantes	27
2.4.1 Fertilizantes Nitrogenados	30
2.4.2 Fertilizantes Fosfatados	32
2.4.3 Fertilizantes Potássicos	34
2.4.4 Fertilizantes Mistos (NPK)	36
2.4 Avaliação de Ciclo de Vida (ACV)	37
3 METODOLOGIA	44
3.1. Definição de Unidade Funcional	44
3.2. Definição dos Limites do Sistema	44
3.3. Análise de Inventário de Ciclo de Vida	44
3.3.1. Biofertilizante	45
3.4. Avaliação de Impacto Ambiental	47
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
4.1. Análise de Inventário	47
4.1.1 Cultivo	47
4.1.2 Filtração e Secagem	48
4.1.3 Processo de extrusão	48
4.1.4 Transporte do Biofertilizante para o campo	49
4.2. Fertilizante NPK	49
4.2.1. Contribuição de Fertilizante Nitrogenado do NPK	50
4.2.2. Contribuição de Fertilizante Fosfatado do NPK	52
4.2.3 Contribuição de Fertilizante Potássico do NPK	54
4.2.4. Contribuição da Dolomita para o NPK	55
4.3. Avaliação de Impacto Ambiental	57
4.4. Comparações	60
4.5 Análise de Sensibilidade	63
	13

4.6 Interpretações para refinamento	64
5 CONCLUSÕES	65
5.1. Sugestões para Trabalhos Futuros	65
REFERÊNCIAS	67

1 INTRODUÇÃO

Com o avançar do aumento dos gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera e as preocupações com as consequências relacionadas ao impacto que eles podem causar no clima, medidas e práticas estão sendo tomadas para reduzir a pegada de carbono de atividades e produtos. Segundo a Quarta Comunicação Nacional do Brasil à United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC, 2021), a agropecuária é responsável pela maior fonte de emissões de GEE do Brasil, com o equivalente a 33,2% das emissões. Nesse setor, o manejo de solos agrícolas aparece como a segunda maior fonte, responsável por cerca de 31% das emissões, sendo parte delas atribuída pelo uso de fertilizantes sintéticos. Além disso, 1% das emissões da agropecuária estão relacionadas à aplicação de ureia, que gera óxido nitroso (N_2O), um gás com potencial de aquecimento global cerca de 273 vezes maior que o dióxido de carbono (CO_2), conforme o Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2023).

Na agricultura local utiliza-se amplamente de fertilizantes sintéticos convencionais ricos em nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K), cuja produção é intensiva em energia e em carbono por serem oriundos de extração mineral ou de refino de petróleo. No entanto, cerca de 85% desses fertilizantes foram importados em 2022 (BRASIL, 2022), o que caracteriza uma forte dependência externa no setor da economia que possui maior contribuição para o PIB brasileiro. Diante dessa problemática, o Plano Nacional de Fertilizantes (PNF) coordenado pelo Conselho Nacional de Fertilizantes e Nutrição de Plantas (CONFERT) busca diminuir essa dependência e aumentar a eficiência e sustentabilidade na produção e uso dos fertilizantes (BRASIL, 2023). Desse modo, o estudo realizado demonstra relevância e evidencia o potencial dos biofertilizantes como uma alternativa promissora.

A biomassa da cianobactéria *Arthospira sp.* (antigamente mais conhecida como microalga *Spirulina sp.*, sua antiga denominação) é rica em nutrientes como N, P e K, caracterizando o seu potencial fertilizante. Além disso, possui indicativos de contribuir com o aumento do estoque de carbono no solo, tornando-o mais fértil (Abreu et al., 2023). Visando o crescimento da sua biomassa algal, um meio de cultivo rico em nutrientes é essencial, sendo muitas vezes utilizados meios sintéticos que possuem alto valor agregado.

Uma alternativa aos meios de cultivos que possuem compostos sintéticos que encarecem o cultivo da microalga, são os efluentes, como o de cervejaria, que são ricos em nutrientes como carboidratos e N, P e K. A assimilação desses nutrientes do meio pelas microalgas permite não apenas o poder biofertilizante pelo crescimento de sua biomassa, mas também uma

biorremediação do efluente, tratando através da ação antibacteriana e pela redução dos componentes contaminantes para os efluentes e que, simultaneamente, servem de nutrientes para o cultivo (Amenorfenyo et al., 2019).

O biofertilizante gerado é uma alternativa aos fertilizantes sintéticos convencionais, e tem demonstrado um aumento de produtividade nos plantios de cevada, que fornecem o malte para a produção de cerveja (Silva *et al.*, 2024). O reaproveitamento do efluente para alocação no sistema produtivo de biofertilizantes estabelece uma abordagem de economia circular, envolvendo desde a origem do grão de cevada até o rejeito da produção cervejeira.

Embora o cenário descrito estabeleça um cenário de economia circular, é necessário que a redução das emissões de GEE ao substituírmos o uso dos fertilizantes convencionais pelo biofertilizantes sejam comprovadas. Isto permite um direcionamento aos incentivos as mudanças das práticas comuns na agricultura para um atendimento ao Plano Nacional de Fertilizantes e avaliação de uma agricultura mais sustentável.

Portanto, uma análise comparativa das emissões associadas entre os fertilizantes convencionais e o biofertilizante de microalga cultivada em efluente de cervejaria é essencial para os avanços nos estudos visando uma agricultura de baixo carbono, de forma que seja possível quantificar as diferenças entre as práticas.

O estudo foi realizado com o objetivo de contribuir com o projeto desenvolvido em parceria com o Laboratório de Estudos Aplicados à Fotossíntese (LEAF) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e a AMBEV. A pesquisa investigou o uso de *Arthrospira sp.* para a biorremediação do efluente da Cervejaria Nova Rio, localizada no Rio de Janeiro, transformando a biomassa cultivada em biofertilizante. Para complementar o trabalho, uma nova parceria foi estabelecida com o Laboratório ECOCIS, visando avaliar o impacto ambiental do biofertilizante gerado, comparando-o com o fertilizante sintético comercial NPK 5-20-20, comumente utilizado nas plantações de cevada no Rio Grande do Sul (via comunicação interna, 2024). O foco da comparação recai sobre as etapas de produção e transporte, avaliando os impactos relacionados à pegada de carbono.

De acordo com Silva *et al.* (2024), a aplicação desse biofertilizante apresentou crescimento 60% mais rápido da parte aérea da planta de cevada quando comparada com o cultivo realizado com fertilizantes comerciais. Além disso, o cultivo da *Arthrospira sp.* foi capaz de remover do efluente utilizado como meio de cultura, cerca de 56,8%, 100% e 78,7% de nitrato, amônia e sulfato, respectivamente, enquadrando o efluente de acordo com as regulações brasileiras.

Figura 1 – Economia Circular na indústria cervejeira.



Fonte: Elaboração própria a partir da ferramenta Canva.

Portanto, o estudo busca avaliar e comparar os impactos ambientais do biofertilizante gerado pelo projeto em relação ao fertilizante sintético utilizado nas plantações de cevada, com ênfase nas emissões de gases de efeito estufa ao longo das cadeias produtivas e de transporte. Assim, a análise visa contribuir para decisões sobre soluções de economia circular, remediação de efluentes utilizando microalgas e o uso de biomassa como biofertilizante, promovendo a sustentabilidade na indústria e na agricultura.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo deste estudo de análise de ciclo de vida é comparar a pegada de carbono da produção e transporte de 1 Kg de biofertilizante de *Arthospira* sp. cultivada em efluente industrial de cervejaria com 1 Kg de NPK importado, nas proporções 5-20-20.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Quantificar a pegada de carbono do biofertilizante descrito no estudo;
- Quantificar a pegada de carbono do fertilizante NPK (5-20-20);
- Comparar a redução das emissões associadas pela substituição do NPK pelo biofertilizante em diferentes proporções utilizando ACV;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Poluição pelos Efluentes Industriais

Os efluentes industriais são considerados uma desafiadora fonte de poluição ambiental. Eles são gerados durante o processamento e a produção industrial e, em muitos casos, contêm diversos contaminantes como substâncias químicas tóxicas, metais pesados e compostos orgânicos. A complexidade do tratamento dos efluentes industriais está relacionada a sua composição, que por sua vez, se relaciona à atividade industrial empregada. Por isso, é indicado um tratamento adequado para cada tipo de resíduo (TERA AMBIENTAL, 2021), para que sejam cumpridas as exigências ambientais para o seu descarte em corpos hídricos.

Em caso de gerenciamento inadequado, a poluição proveniente de efluentes industriais pode afetar diretamente a qualidade da água, do solo, do ar e impactar a biodiversidade local, causando danos na saúde humana e nos ecossistemas aquáticos (AMB SCIENCE). Além disso, podem causar consequências econômicas para as indústrias devido às sanções por não cumprimento da legislação ambiental, sendo necessária a implementação de sistemas de tratamento eficientes para evitar perdas ambientais e econômicas.

2.1.1 Efluentes da Indústria de Cervejaria

O Brasil é um dos maiores produtores de cerveja do mundo, atrás apenas da China e Estados Unidos (BRASIL, 2023). Assim como há ampla variedade nas bebidas, os efluentes respondem da mesma maneira, variando desde a quantidade até sua composição pelo tipo de cerveja, insumos como o tipo de malte, levedura utilizada e outros aditivos, além dos produtos de limpeza utilizados nos equipamentos (GAUDENCIO, 2013).

Estima-se que a cada 1 litro de cerveja produzida, cerca de 3 a 10 litros de efluentes líquidos são gerados, oriundo do processo produtivo, limpeza de maquinário e refrigeração (Kanagachandran and Jayaratne, 2006; ARANTES, 2018; PORTES, 2016). Suas principais características poluidoras são relacionadas a alta concentração de matéria orgânica, além da

presença significativa de sólidos suspensos e nutrientes como nitrogênio e fósforo, o que dificultam algumas tecnologias de tratamento, exigindo sistemas adequados a serem adotados (GUERREIRO, 2006).

O tratamento adequado é necessário para que o efluente líquido gerado possa ser descartado ao meio ambiente, atendendo as especificações determinadas pela legislação ambiental válida no local. Os principais parâmetros a serem avaliados são referentes à Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Demanda Química de Oxigênio (DQO), pH, sólidos suspensos, nitrogênio e fósforo (ALCANTARA, 2012). Valores elevados de carga orgânica podem levar a altos valores de DBO e DQO, o que significa um maior consumo de oxigênio e, conseqüentemente, uma menor quantidade dissolvida na água, podendo impactar a vida aquática (OLIVEIRA; SUSTAFA, 2015).

O estudo de Gaudencio (2013), apresentado na Tabela 1, destaca as principais características dos efluentes gerados em cervejarias, com ênfase nas altas concentrações de nitrogênio e fósforo, conforme diferentes literaturas.

Tabela 1 – Características dos efluentes de cervejaria.

Parâmetro	<u>Ahn et al.</u> (2001)	<u>Alvarado- Lassman et</u> al. (2009)	<u>Cronin & Lo</u> (1998)	<u>Oktem & Tufekci</u> (2006)	<u>Simate et</u> al. (2011)
DQO (mg.L-1)	920 - 1910	2083	600 - 5600	870 - 5065	2000 - 6000
DBO (mg.L-1)	720 - 1470	1375	750 - 3000	350 - 4200	1200 - 3600
pH	6,3 - 7,0	10	4,0 - 12,0	5 - 11,2	3,0 - 12,0
Temperatura (°C)	-	-	-	-	18 - 40
NTK (mg.L-1)	16,4 - 36,5	116	300	13-50	25 - 80
Fósforo (mg.L-1)	5,3 - 12,5	4,8	-	1,75 - 7,20	10,0 - 50,0
SST (mg.L-1)	61 - 378	750	40-1000	190 - 970	2901 - 2000
SSV (mg.L-1)	43 - 200	-	40-600	-	-
N-amoniaco (mg.L-1)	3 - 11,5	13,3	-	1,12 - 5	-

Fonte: Gaudencio (2013).

Em caso de tratamento ou disposição inadequada, esses efluentes podem impactar negativamente os corpos hídricos. O excesso de matéria orgânica diminui a concentração de oxigênio dissolvido que é utilizado na respiração no ambiente aquático, enquanto o pH elevado

pode afetar o crescimento de microrganismos responsáveis pela oxidação da matéria orgânica, dureza da água e de processos de coagulação (JORDÃO; PESSÔA, 2014; VON SPERLING, 2017). Já os sólidos suspensos estão relacionados a turbidez, podendo afetar a fotossíntese dos seres aquáticos. Além disso, o excesso de nitrogênio e fósforo podem levar ao desenvolvimento exacerbado de algas e gerar eutrofização do ambiente. A forma oxidada do nitrogênio também pode gerar impacto, como o desenvolvimento de doenças como metemoglobinemia a partir do nitrato ou sendo tóxica aos peixes como a amônia (JORDÃO; PESSÔA, 2014; VON SPERLING, 2017). Dessa forma, é imprescindível que haja um tratamento adequado para os efluentes de cervejaria.

2.2 Tratamento de Efluentes de Cervejaria

Uma estação de tratamento de efluentes (ETE) é amplamente utilizada no tratamento de efluentes industriais como uma sequência de diferentes operações unitárias envolvendo processos físico-químicos e biológicos para reduzir a carga de poluentes. A ETE de cervejaria geralmente é dividida em tratamento em tratamento preliminar, primário ou químico e secundário ou biológico (OLAJIRE, 2012).

O tratamento preliminar é baseado em processos físicos de separação para remoção sólidos grosseiros e areia, a partir do peneiramento e sedimentação através de grades e decantadores. O tratamento primário é responsável por remover sólidos sedimentáveis e parte da matéria orgânica, enquanto o tratamento secundário utiliza de processos biológicos, podendo ser anaeróbios e/ou aeróbios, para remover a matéria orgânica e nutrientes a partir de microrganismos. Reatores anaeróbios, lodos ativados, filtração biológica e lagoas de estabilização são normalmente utilizados nos tratamentos secundários (VON SPERLING, 2017).

O tratamento anaeróbio atua em condições de ausência de oxigênio. Ele é caracterizado pela transformação biológica de compostos orgânicos em biogás por microrganismos anaeróbios que pode ser utilizado como combustível (Briggs et al., 2004). Segundo Olajire (2012), o tratamento biológico aeróbio é realizado na presença de oxigênio a partir de microrganismos capazes de metabolizar matéria orgânica e transformá-las em produtos

inorgânicos como CO₂, NH₃ e H₂O. Dessa forma, os microrganismos aeróbios convertem sólidos não sedimentáveis em sólidos sedimentáveis, permitindo que os sólidos sedimentáveis possam decantar.

A quantidade de energia e geração de lodo de biomassa são alguns fatores que diferem entre os tipos de tratamento biológico aeróbio e anaeróbio (KANAGACHANDRAN & JAYARATNE, 2006).

Tabela 2 – Comparação genérica entre sistema aeróbio e aeróbio no tratamento de águas residuárias.

	Sistema Aeróbico	Sistema Anaeróbico
Consumo de energia	Alto	Baixo
Produção de energia	Não	Sim
Geração de lodo	Alta	Baixo
Remoção DQO (%)	90-98	70-85
Remoção de nutrientes		
(Nitrogênio/Fósforo)	Alta	Baixa
Espaço requerido	Grande	Pequeno

Fonte: Gaudêncio (2013).

Em alguns parâmetros, os tratamentos biológicos anaeróbios são mais vantajosos que os aeróbios, como por exemplo a menor produção de lodo, o menor custo operacional, não exigir fornecimento de oxigênio, além da produção de biomassa estabilizada. Entretanto, as associações entre os dois tipos de tratamento são aconselháveis para enquadrar o efluente dentro dos parâmetros exigidos pela legislação (CHEN; SENG; HUNG, 2006).

Eventualmente, o tratamento terciário pode ser necessário para remover poluentes mais específicos ou complementar a remoção após o tratamento secundário, como o uso de membranas filtrantes e osmose reversa (VON SPERLING, 2005). De acordo com Sereno Filho *et al.* (2013), para uma efetiva remoção de poluentes que atenda aos padrões de descarte é necessária uma combinação de processos de remoção de poluentes.

O tratamento de efluentes de cervejaria enfrenta desafios relacionados à alta carga orgânica e à presença de nutrientes como nitrogênio e fósforo, que demandam processos eficientes para atender aos padrões ambientais. Além disso, o elevado consumo de energia e a

geração de grandes volumes de lodo tornam os métodos convencionais menos sustentáveis, evidenciando a necessidade de tecnologias mais eficazes e com menor impacto ambiental.

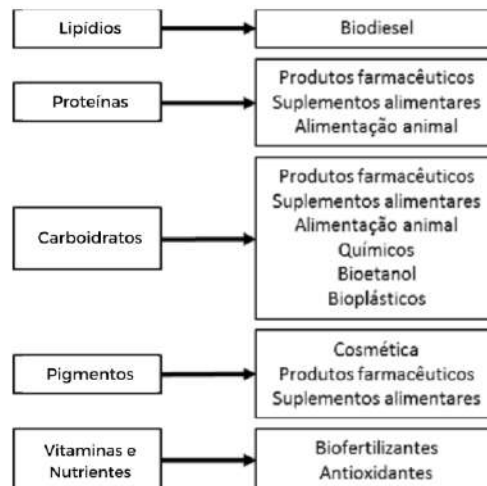
Nesse contexto, as microalgas apresentam-se como uma alternativa promissora no tratamento desses efluentes, com destaque para seu potencial de cultivo em efluente bruto, contribuindo significativamente para a redução de poluentes.

2.3 Microalgas

As microalgas são microrganismos fotossintéticos, geralmente localizados em ambientes aquáticos de água doce ou marinhos (Tomaselli, 1997; Pignolet *et al.*, 2013), e que podem ser procarióticos, como as cianobactérias, ou eucarióticos (Olaizola, 2003), com propriedades bioquímicas únicas não encontradas em plantas superiores (HOSIKIAN *et al.*, 2010). As microalgas se destacam por sua contribuição no balanço global de fotossíntese, sendo responsável por 50% da atividade fotossintética global (CHIU *et al.*, 2015; MILANO *et al.*, 2016) e por 90% da fotossíntese realizada no mar (Lourenço, 2006).

Na conversão da energia solar em energia química pela fotossíntese, as microalgas são capazes de produzir diversos compostos de alto valor agregado e alguns com propriedades bioativas, como os lipídeos, pigmentos, ácidos graxos, proteínas, vitaminas e carboidratos (BRENNAN; OWENDE, 2010). Considerando o potencial dos compostos gerados, diversas aplicações têm sido empregadas e estudadas, como em nutrição humana e animal, produção de compostos bioativos, fontes potenciais de biocombustíveis, produção de biomassa, corantes naturais, antioxidantes, fixação de carbono, bioindicadoras de qualidade de água, no tratamento de efluentes líquidos e gasosos e também como biofertilizantes (BROWN *et al.*, 1997; KIRK; BEHRENS, 1999; GROBBELAAR, 2004; DERNER *et al.*, 2006; DOGARIS *et al.*, 2010; RIZWAN *et al.*, 2018; Perez-Garcia *et al.*, 2011).

Figura 2 - Compostos produzidos pelas microalgas



Fonte: Adaptado de SAFI *et al.* (2014) apud Bignon L. M. P. (2023).

As rotas metabólicas de crescimento das microalgas variam de acordo com as espécies, fonte de energia e carbono disponíveis no meio de cultivo e podem ser gerenciadas para otimização dos metabólitos de interesse. Em geral, há três modos metabólicos diferentes: i) fotoautotróficos, em que a fonte de carbono do meio é inorgânica, proveniente do CO₂, e há utilização de luz para a fotossíntese, natural ou artificial; ii) heterotrófico, em que são oferecidas fontes de carbono orgânicas, como a glicose, para produção de biomassa e sem a necessidade de luz solar; ou iii) mixotrófico, no qual tem a capacidade de realizar a fotossíntese e absorver a matéria orgânica ao mesmo tempo, sendo um mecanismo misto entre o autotrófico e o heterotrófico, com utilização de fontes orgânicas e inorgânicas de carbono (KUNJAPUR; ELDRIDGE, 2010; CECCHIN *et al.*, 2018).

Os cultivos das microalgas podem ser realizados em diferentes tipos de sistemas, como os fotobiorreatores abertos, fotobiorreatores fechados e fermentadores. Este último é designado para cultivos heterotróficos (MILANO *et al.*, 2016), enquanto os fotobiorreatores em placas planas, tubulares ou colunas são exemplos de sistemas fechados. Nestes sistemas há maior potencial em termos de produtividade, possibilidade de uso de diferentes espécies e alto controle das condições de cultivo, contudo, com um investimento inicial e custos de manutenção elevados (PRUVOST *et al.*, 2016; NARALA *et al.*, 2016).

Para sistemas abertos, as lagoas abertas e tanques do tipo *raceway ponds* ilustram formas mais econômicas em relação à energia, com maior disponibilidade de luz solar, menores custos de instalação e operação em relação aos sistemas fechados, mas com vulnerabilidade em relação à contaminação e baixo controle das condições operacionais. O *raceway* consiste em um fotorreator em formato oval, similar a uma piscina rasa, com cerca de 30 a 40 cm de profundidade para priorizar a luz e contato direto com o ar atmosférico. Além disso, o meio de cultivo presente no tanque é agitado de forma mecânica por pás rotativas que determinam um fluxo em uma única direção (NASCIMENTO, 2016).

Figura 3 – Microalgas cultivadas em *raceway ponds*



Fonte: WaterWorld (2012). Disponível em: <https://www.waterworld.com/wastewater-treatment/article/16201488/algae-biofuel>.

A taxa de crescimento das microalgas depende de condições apropriadas como temperatura, pH, iluminação e nutrientes (SUN *et al.*, 2016). Cada espécie possui uma faixa de temperatura e pH ideal para sua atividade fotossintética (RANGLOVÁ *et al.*, 2019; QIU *et al.*, 2017; ZUCCARO *et al.*, 2020), assim como a intensidade de luz para espécies fotoautotróficas. Além disso, o metabolismo demanda nutrientes como carbono, nitrogênio e fósforo para o seu crescimento (ARAVANTINOU *et al.*, 2013).

Em geral, as microalgas possuem baixa exigência nutricional, com a capacidade de algumas espécies serem cultivadas em águas salinas, em terrenos impróprios para a agricultura e até mesmo em efluentes (DOGARIS *et al.*, 2015; DEMIRBAS, 2010; MATA *et al.*, 2010; DANESHVAR *et al.* 2021). As habilidades das microalgas de capturar nutrientes presentes no meio, como os presentes em águas residuais, e capturar emissões gasosas permitem o seu uso para fixação de carbono e produção de biomassa (Perez-Garcia *et al.*, 2011).

2.3.1. *Arthrospira sp.*

O gênero *Arthrospira*, conhecido como *Spirulina*, é uma cianobactéria procariótica filamentosa, de cor verde-azulada com potencial aplicação industrial em diferentes áreas, como na medicina e na indústria alimentícia (BEHESHTIPOUR *et al.*, 2012). O seu alto potencial biotecnológico é dado pela composição rica de sua biomassa, com alto teor proteico e de nutrientes como vitaminas e minerais, óleos de qualidade, além de pigmentos como ficocianina (SWITZER, 1980; WALTER *et al.*, 2011; AJAYAN *et al.*, 2012; GROSSHAGAUER *et al.*, 2020; NICOLETTI, 2016).

Figura 4 - Foto representativa de *Arthrospira sp.*



Fonte: <https://algaebank.com.mx>

As espécies de mais relevantes dentro do gênero *Arthrospira* são *A. platensis* e *A. máxima*, um grupo de cianobactérias que podem ser encontradas em diversos ambientes, com predominância em lagos alcalinos e salobros. São organismos fotoautotróficos, com faixa ideal de temperatura entre 30 °C a 35 °C (HU, 2004; OLIVEIRA et al., 1999), demandam incidência luminosa para o seu metabolismo e são tolerantes à meios com altas concentrações de NaCl (HU, 2004). Além disso, são alcalófilas obrigatórias, com pH ideal por volta de 10 (Çelekli; Yavuzatmaca; Bozkurt, 2009), o que é essencial para a predominância da espécie em cultivos abertos em larga escala por dificultar a permanência de outros microrganismos (HU, 2004).

O destino da biomassa de *Arthrospira* tem efeito direto na determinação dos parâmetros de cultivo, como faixas específicas de temperatura que influenciam na concentração de diferentes substâncias de interesse. Além disso, a composição dos nutrientes do meio de cultivo também é responsável pela concentração das substâncias e devem ser avaliados conforme necessidade, evitando custos adicionais, mas mantendo a integridade da microalga (LOURENÇO, 2006; CAMACHO; WIT, 2003).

Dentre os nutrientes necessários para o desenvolvimento das microalgas, o carbono é um dos principais e presente em maior quantidade, por ser necessário na constituição das substâncias orgânicas que as células sintetizam, como proteínas, carboidratos, lipídeos, entre outros (LOURENÇO, 2006). Durante a fotossíntese, as microalgas fixam grandes quantidades de dióxido de carbono, com aproximadamente 50% do peso seco da biomassa composto por carbono derivado de CO₂. Estima-se que a produção de 100 toneladas de biomassa algal seja capaz de fixar cerca de 183 toneladas de dióxido de carbono (SÁNCHEZ MIRÓN et al., 2003; CHISTI, 2007). Embora a fotossíntese seja a principal rota de fixação de carbono, alguns gêneros, como *Arthrospira*, apresentam metabolismo mixotrófico, combinando a fotossíntese com a assimilação heterotrófica de compostos orgânicos presentes no meio (CHOJNACKA; NOWORYTA, 2004).

A fonte de carbono que geralmente é utilizada em meios de cultura é o bicarbonato de sódio, pois também possui a função manter a condição de pH do cultivo (GROBBELAAR, 2004). De acordo com Laliberté; Olguín; de La Noue (1997), a maior parte dos gastos operacionais são oriundos da suplementação de carbono. Portanto, formas alternativas de fornecimento de carbono são estudadas, como o uso de melaço, glicose e efluentes ricos em matéria orgânica (ANDRADE; COSTA, 2008; LODI et al., 2005; NAGARAJAN et al., 2020).

O nitrogênio e o fósforo também são nutrientes fundamentais para o metabolismo da *Arthrospira*. Proteínas, clorofila e ácidos nucleicos são exemplos de estruturas e substâncias

que necessitam de nitrogênio para serem geradas (LOURENÇO, 2006). Enquanto, moléculas orgânicas como fosfolipídios e ácidos nucleicos estão associadas ao fósforo (ÇELEKLI; YAVUZATMACA; BOZKURT, 2009). Estes nutrientes são essenciais no meio para o desenvolvimento das microalgas e podem ser removidos de alguns efluentes para aproveitamento do metabolismo algal, evitando eutrofização de corpos hídricos após a disposição final desses efluentes (STURM & LAMER, 2011).

A biomassa de microalgas cultivadas em águas residuais serve como matéria-prima para fertilizantes devido à presença de macro e micronutrientes essenciais, como nitrogênio, fósforo, zinco, manganês, ferro e cálcio (PEREIRA, 2021).

2.3.2. Aplicações como Biofertilizante

Os biofertilizantes são produtos que contêm microrganismos vivos ou compostos naturais originados de organismos como bactérias, fungos e algas, com a função de melhorar as características químicas e biológicas do solo, estimular o crescimento das plantas e recuperar sua fertilidade (ABDEL-RAOUF et al., 2012). Esses produtos são altamente eficientes na fixação de nitrogênio, solubilização de fosfatos e degradação de celulose, o que facilita a liberação de nutrientes no solo (GOVÊA, 2023). Assim, eles se apresentam como uma fonte sustentável para substituir fertilizantes químicos, oferecendo alta eficácia (BERRUTI et al., 2016; MOHAMMADI; SOHRABI, 2012; BORASTE et al., 2009;).

Estudos sobre o uso de microalgas cultivadas em efluentes demonstraram seu potencial como biofertilizantes e bioestimulantes, obtendo resultados favoráveis, tanto no aumento do crescimento das plantas quanto na substituição de fertilizantes sintéticos (RENUKA *et al.*, 2016; DAS *et al.*, 2019; SILVA *et al.*, 2019; SULEIMAN *et al.*, 2020), aumentando a disponibilidade de nutrientes para as mesmas (VESSEY, 2003; BORASTE *et al.*, 2009).

Em microalgas, a ação bioestimulante é atribuída à presença de várias substâncias, como aminoácidos e peptídeos (JIE et al., 2008; RAMOS-SUÁREZ et al., 2014); proteínas, polissacarídeos, fitormônios (LU; XU, 2015), vitaminas e minerais (PRIYADARSHANI; RATH, 2012; CHEW et al., 2017). Além disso, as microalgas também produzem outros compostos nitrogenados que podem impactar positivamente o crescimento e o desenvolvimento das plantas (CAZZANIGA et al., 2014; BURCZYK et al., 2014).

Biofertilizantes de algas, como as cianobactérias das espécies *Nostoc sp.*, *Anabaena sp.*, *Tolypothrix sp.*, *Aulosira sp.*, entre outras, possuem a capacidade de fixar nitrogênio atmosférico e são aplicados em plantações de arroz (CHATTERJEE et al., 2017). De acordo com Garcia-Gonzalez e Sommerfeld (2015), a biomassa de *Scenedesmus dimorphus* demonstrou influência no desenvolvimento de cultivo de mudas de tomate através do aumento da massa total das plantas. Além disso, efeitos positivos da inoculação de cianobactérias também foram relatados em várias outras culturas, como cevada, aveia, rabanete, cana-de-açúcar, milho, pimenta e alface (Thajuddin e Subramanian, 2005).













Segundo Kawalekar (2013), o uso de microalgas como biofertilizantes oferece uma alternativa econômica, sustentável e ecológica aos fertilizantes convencionais, contribuindo para o aumento da produção agrícola e a redução da poluição ambiental. Diferentemente dos fertilizantes sintéticos, esses biofertilizantes preservam a biodiversidade e evitam o acúmulo de resíduos químicos em plantações e alimentos, garantindo segurança à saúde humana (BEHERA, 2021). Assim, o emprego de microalgas permite uma valorização estratégica de nutrientes e recursos (NAYAK et al., 2019; DAS et al., 2019; SILAMBARASAN et al., 2021).

2.4. Fertilizantes

A legislação brasileira define fertilizantes como “*substância mineral ou orgânica, natural ou sintética, fornecedora de um ou mais nutrientes vegetais*”. Para que as espécies das plantas completem o seu ciclo de vida, alguns nutrientes essenciais são necessários, como micronutrientes e macronutrientes.

Boro (B), ferro (Fe), cloro (Cl), cobre (Cu), manganês (Mn), molibdênio (Mo), zinco (Zn), cobalto (Co) e silício (Si) são exemplos de micronutrientes demandados pelas plantas, enquanto cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S) são os macronutrientes secundários (NUNES, 2022). No entanto, são os macronutrientes principais que são os responsáveis pela classificação dos fertilizantes, sendo eles o nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K). (LINES-KELLY, 1992).

Figura 5 - Maiores consumidores de Fertilizantes (mi t)

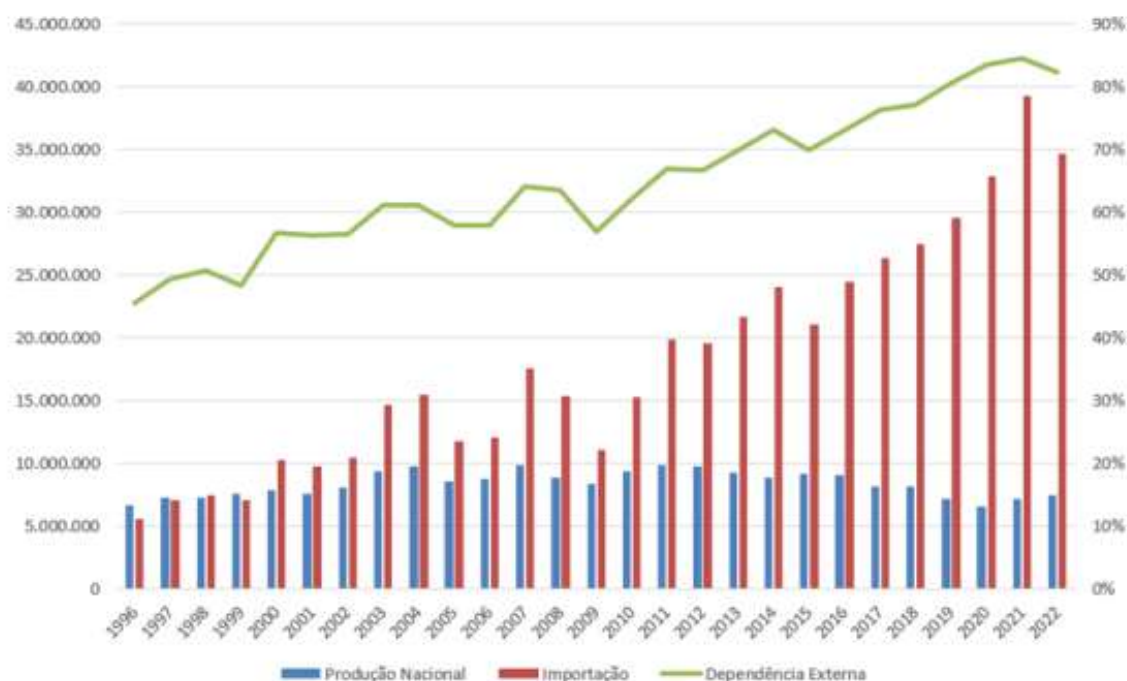
	N	P	K
1º	 China	 China	 China
2º	 Índia	 Índia	 Brasil
3º	 EUA	 Brasil	 EUA
4º	 Brasil	 EUA	 Índia

Fonte: GlobalFert (2024)

Cada cultura demanda quantidades específicas desses nutrientes, e após os ciclos de plantio e colheita, a absorção pela vegetação desgasta o solo, tornando a reposição através dos fertilizantes essencial para manter o rendimento e até aumentar a produtividade agrícola (REETZ, 2017). Os fertilizantes minerais, baseados nos principais macronutrientes exigidos pelas plantas, são divididos em quatro categorias: nitrogenados, fosfatados, potássicos e NPK, (ALMEIDA, 2018).

Em 2022, o Brasil importou cerca de 85% dos fertilizantes consumidos e 15% originados da produção nacional (PNF, 2023). A figura 6 demonstra a evolução da dependência externa do Brasil em relação aos fertilizantes, enquanto a figura 7 demonstra essa proporção em relação a cada macronutriente.

Figura 6 - Evolução da Produção Nacional e Importações de Fertilizantes (1996-2022)



Fonte: Anda (2022), Elaboração: Sinprifert

Figura 7 - A dependência externa por Fertilizantes



Fonte: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA)

Um aspecto relevante relacionado aos fertilizantes é o elevado consumo energético tanto na sua produção quanto na produção das matérias-primas envolvidas. Em termos gerais, a fabricação de fertilizantes representa aproximadamente 2,5% das emissões totais de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera, devido ao uso de energia fóssil para sua síntese,

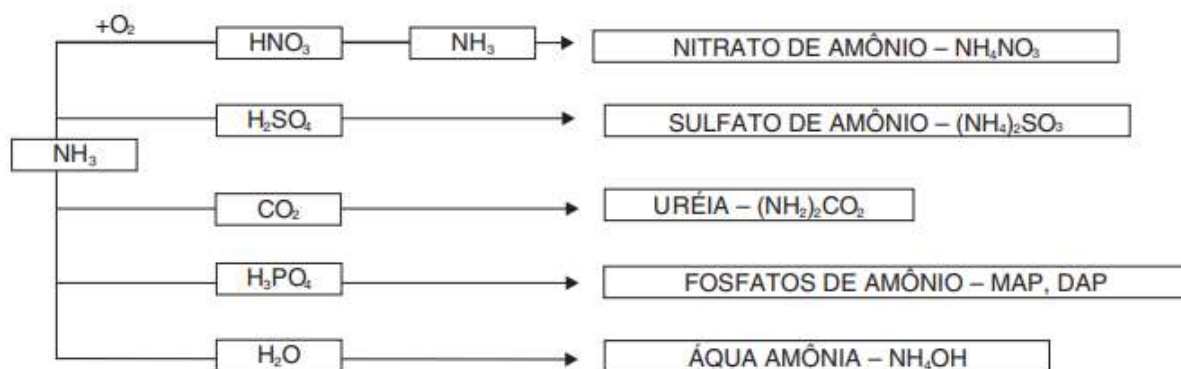
processamento e transporte, além das reações que ocorrem no solo após sua aplicação (PNF, 2023).

2.4.1 Fertilizantes Nitrogenados

Os fertilizantes nitrogenados são essenciais para as culturas agrícolas, pois fornecem o nitrogênio (N), um macronutriente fundamental para a fotossíntese e a síntese de proteínas nas plantas. Como a maioria das culturas, exceto as leguminosas, não consegue absorver diretamente o nitrogênio atmosférico, a adubação nitrogenada é fundamental para suprir essa necessidade, promovendo o crescimento e aumentando a produtividade (Malavolta, 1980; Reetz Jr., 2017).

O sulfato de amônio, nitrato de amônio e a ureia são fertilizantes nitrogenados mais comuns, sendo esta última o fertilizante mais utilizado no mundo devido à facilidade de produção (IPNI BRASIL, 2017) e com destaque nesse estudo. A ureia contém 46% de nitrogênio em sua composição e é um sólido altamente solúvel em água, com susceptibilidade à volatilização e baixa corrosividade (REETZ JR, 2017).

Figura 8 - Rota de Produção de Fertilizantes Nitrogenados.



Fonte: <http://www.fertipar.com.br/>

A produção de fertilizantes nitrogenados é baseada na indústria de petróleo e gás, que gera amônia e ácido nítrico, principais matérias-primas para a fabricação de ureia e nitrato de amônio (GLOBALFERT, 2024). Esses fertilizantes são formulados a partir da amônia anidra (NH_3), obtida pelo processo de Haber-Bosch através da síntese de nitrogênio atmosférico com

hidrogênio extraído principalmente do gás natural, mas também podendo ser da nafta, carvão e resíduos asfálticos (ALMEIDA, 2018; REETZ JR, 2017; PNF, 2023). A produção de ureia acontece pela reação entre o gás amônia e dióxido de carbono, em condições de temperatura e pressão elevadas (REETZ, 2017).

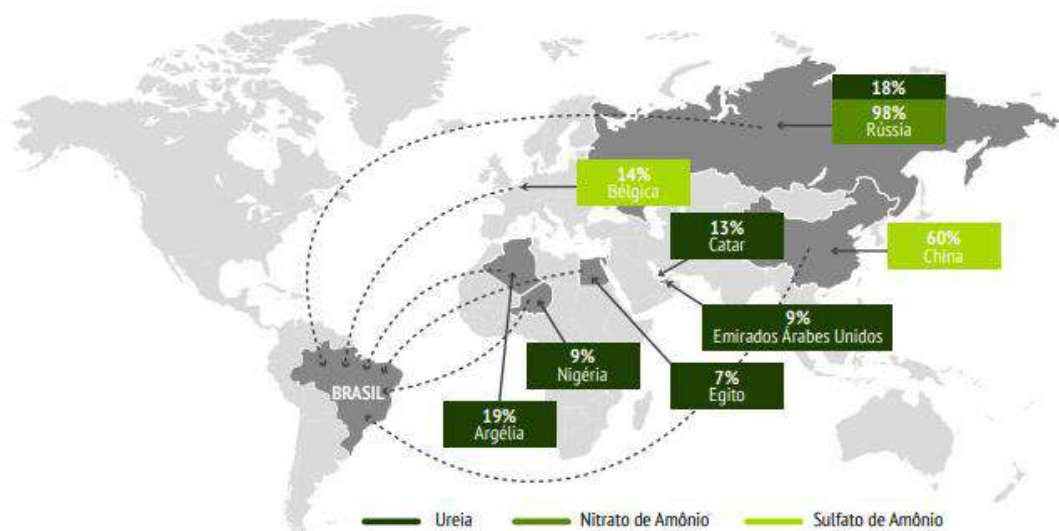
Figura 9 - Principais produtores de nitrogenados.



Fonte: GlobalFert (2024)

O Brasil ainda não produz fertilizantes nitrogenados em volume suficiente para atender à demanda nacional, levando à importação de 11,07 milhões de toneladas em 2023, denotando forte dependência externa (GLOBALFERT, 2024; INPI, 2023). A principal origem da ureia ao Brasil em 2023 foi de Omã, seguida por Catar, Nigéria, Rússia e Argélia, representando 78% volume de chegada ao país (GLOBALFERT, 2024).

Figura 10 - Principais locais de origem de fertilizantes nitrogenados em 2018.



Fonte: GlobalFert

Embora o nitrogênio seja o nutriente mais demandado pelas culturas, cerca de 50% do fertilizante aplicado no solo é perdido por lixiviação, volatilização e desnitrificação (Bredemeier & Mundstock, 2000), processos que contribuem para a emissão de óxido nitroso (N_2O), um potente gás de efeito estufa. Este gás gera impactos negativos ao ambiente por contribuir para o aquecimento global através de sua potência de aquecimento 273 vezes maior que o dióxido de carbono em um horizonte de 100 anos (IPCC, 2023).

Os desafios do setor se concentram na necessidade de inovação na produção, redução das emissões de gases de efeito estufa e aumento da eficiência no manejo da fertilização, de forma que haja menor quantidade de perdas e aumento da absorção dos nutrientes pelas plantas (Amado et al., 2000; PNF, 2023).

2.4.2 Fertilizantes Fosfatados

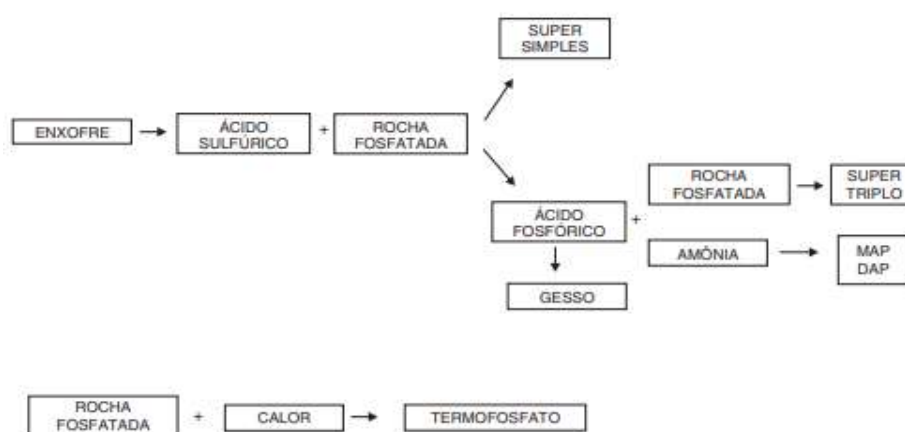
Os fertilizantes fosfatados possuem em sua composição o fósforo como macronutriente principal, expressado na forma de óxido (P_2O_5). Ele possui papel fundamental para a

fotossíntese das plantas, além de atuar em funções importantes como no metabolismo de açúcares, armazenamento e transferência de energia (POTAFOS, 2005).

Entre os fertilizantes fosfatados mais comuns estão o superfosfato simples (SSP), que fornece fósforo, cálcio e enxofre, e o superfosfato triplo (TSP), altamente concentrado e solúvel, adequado para culturas que não requerem nitrogênio. O fosfato de monoamônio (MAP) e o fosfato de diamônio (DAP) também são amplamente utilizados devido à alta concentração de fósforo e à praticidade de aplicação. O DAP, em particular, destaca-se como o fertilizante fosfatado mais utilizado no mundo, pela combinação de nitrogênio e fósforo, além de sua facilidade de manuseio e armazenamento (REETZ JR, 2017).

A produção de fertilizantes fosfatados utiliza principalmente rochas fosfáticas que contêm compostos de fósforo em sua forma mineral, como a apatita. Esses fosfatos possuem um teor de 24 a 27% de P_2O_5 total, mas apresentam baixa solubilidade. Por isso, o minério necessita passar por um processo de beneficiamento, onde é triturado e tratado com ácidos, como o ácido sulfúrico, para produzir ácido fosfórico, que serve como base para a fabricação de fertilizantes, como SSP e TSP (Messias et al, 2006). Além do ácido sulfúrico, o ácido fosfórico é combinado com amônia para produzir MAP e DAP (Messias et al, 2006).

Figura 11 - Rota de Produção dos Principais Fertilizantes Fosfatados Produzidos no Brasil.

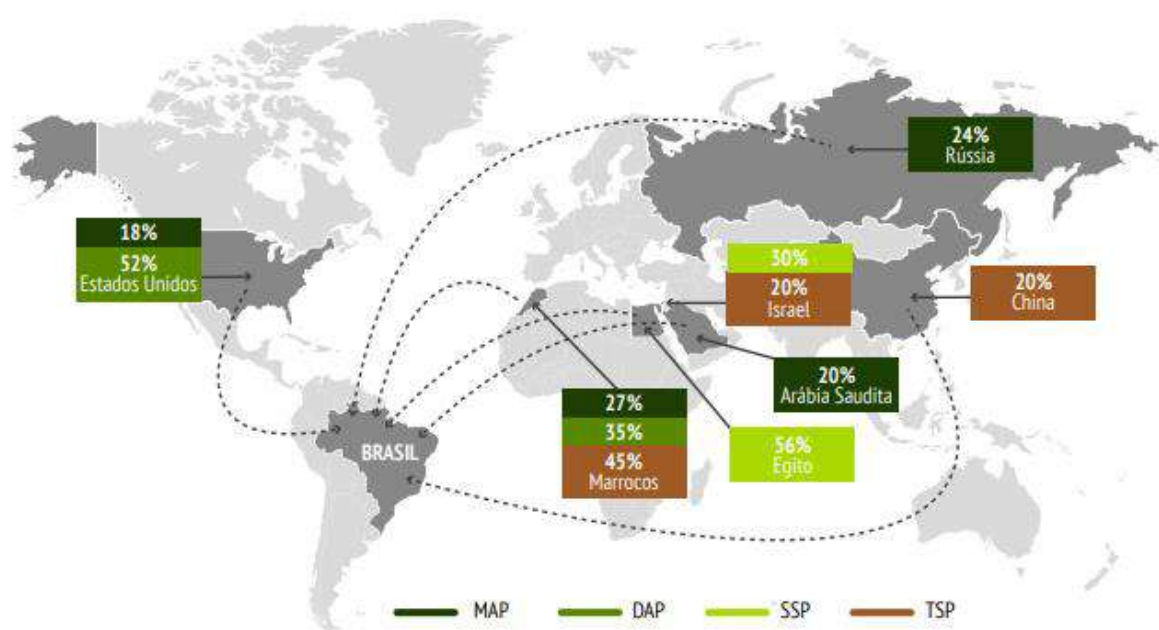


Fonte: <http://www.fertipar.com.br/>

O processo de mineração e beneficiamento das rochas fosfáticas exige um alto consumo energético, principalmente devido ao uso de combustíveis fósseis e do uso de amônia. Além

disso, assim como os outros fertilizantes, o transporte dos fosfatados ao Brasil possuem relevância devido à falta de capacidade da produção nacional de atender a demanda interna, com a necessidade da importação de cerca de 9,3 milhões de toneladas em 2023 dos países representados na figura abaixo (GLOBALFERT, 2024).

Figura 12 - Principais locais de origem de fertilizantes fosfatados em 2018.



Fonte: GlobalFert

2.4.3 Fertilizantes Potássicos

Os fertilizantes potássicos possuem o macronutriente potássio em sua composição, expresso na forma de óxido K_2O . É o nutriente mais consumido como fertilizante após o nitrogênio, com papel fundamental na formação de carboidratos e contribui para a absorção de outros nutrientes, equilibra a aplicação de nitrogênio e no uso de água pela vegetação (RABELO, 2015). Os principais fertilizantes potássicos são cloreto de potássio e sulfato de potássio (ALMEIDA, 2018; REETZ, 2017). Neste estudo, daremos enfoque ao cloreto de

potássio, visto que ele corresponde a 90% da produção de fertilizantes potássicos (GLOBALFERT, 2024).

O cloreto de potássio possui uma cadeia de produção relativamente simples em comparação com outros fertilizantes, sendo extraído de minerais como a carnalita e a silvinita. Com 60 a 63% de K_2O , ele contém entre 50 e 52% de potássio (K) e 45 a 47% de cloro (Cl). A maior parte dos depósitos de potássio se origina de antigos depósitos marinhos localizados em profundidades consideráveis abaixo da superfície, onde o KCl está misturado com NaCl formando a rocha conhecida como silvinita. A tecnologia envolve um processo de dissolução sob pressão a quente e recristalização por resfriamento e redução de pressão (DIAS; FERNANDES, 2006). Durante o processamento, o mineral é triturado para separar o KCl do NaCl (REETZ, 2017).

Figura 13 - Principais origens de Cloreto de Potássio para o Brasil.



Fonte: GlobalFert

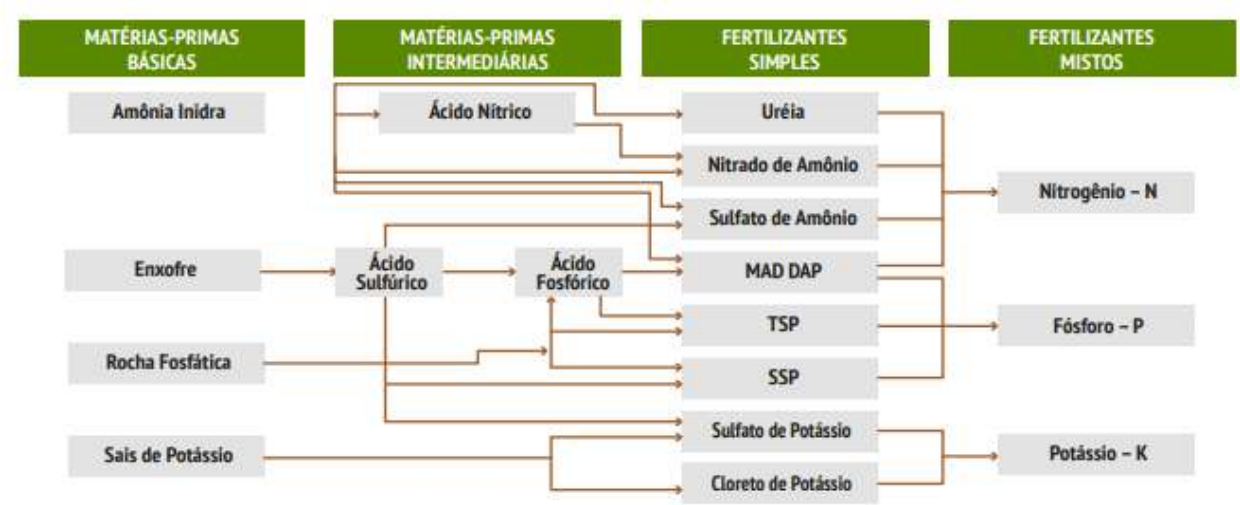
Fonte: GlobalFert (2024)

O potássio no solo tem sua origem a partir da decomposição das rochas, no entanto, os solos brasileiros possuem baixa disponibilidade do mesmo (RABELO, 2015), o que implica na dependência pela importação do fertilizante. O Brasil importa mais de 90% de todo o potássio

que se consome, sendo referente a 13,1 milhões de toneladas de Cloreto de Potássio no ano de 2023, com cerca de 66,7% de origem do Canadá e Rússia (GLOBALFERT, 2024).

2.4.4 Fertilizantes Mistos (NPK)

Figura 14 - Esquema explicativo sobre a produção de fertilizantes.



Fonte: Associação Nacional para Difusão de Adubos (ANDA)

Os fertilizantes NPK são misturas que fornecem os três macronutrientes essenciais: nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K), com proporções ajustadas para diferentes tipos de solo. São produzidos em fábricas misturadoras a partir da proporção definida, envolvendo o processo de granulação e podendo conter nutrientes secundários e micronutrientes para garantir maior produtividade em um único produto (KULAIF, 2009).

Segundo REETZ (2017), a concentração do NPK definida em sua fórmula pode se referir à concentração total ou disponível dos nutrientes, sendo expressa tradicionalmente em forma óxidos para os componentes fosfatados e potássicos, como N, P₂O₅, K₂O, ou na forma elementar, como N, P, K. O fator de conversão de K para K₂O é 1,20 e de P para P₂O₅ é 2,29, ambos seguindo as massas molares dos componentes elementares na formulação dos óxidos. Nesse estudo, será abordado a forma elementar de referência. Por exemplo, uma fórmula de fertilizante 10-10-10 contém 10% de N, 10% de P e 10% de K.

No ano de 2020, o Brasil consumiu cerca de 40,5 milhões de toneladas de fertilizantes NPK (PNF, 2023). De acordo com a GlobalFert (2021), as principais empresas formuladoras e distribuidoras de NPK no Brasil incluem Mosaic, Yara, Fertipar, EuroChem e Heringer, além da existência de mais de 60 misturadoras com unidades distribuídas pelo país.

2.4 Avaliação de Ciclo de Vida (ACV)

A Avaliação de Ciclo de Vida é uma metodologia utilizada para avaliar impactos ambientais de produtos ou serviços a partir de todo o seu ciclo de vida, desde a extração de matéria prima até o final da vida (EUROPEAN COMMISSION, 2024). Ela é normatizada pela *International Organization for Standardization* (ISO), seguindo as diretrizes das normas ABNT NBR ISO 14040:2001 e ABNT NBR ISO 14044:2009 que norteiam e permitem que os resultados de estudos realizados por diferentes profissionais sejam consistentes.

Figura 15 - Ciclo de vida do produto



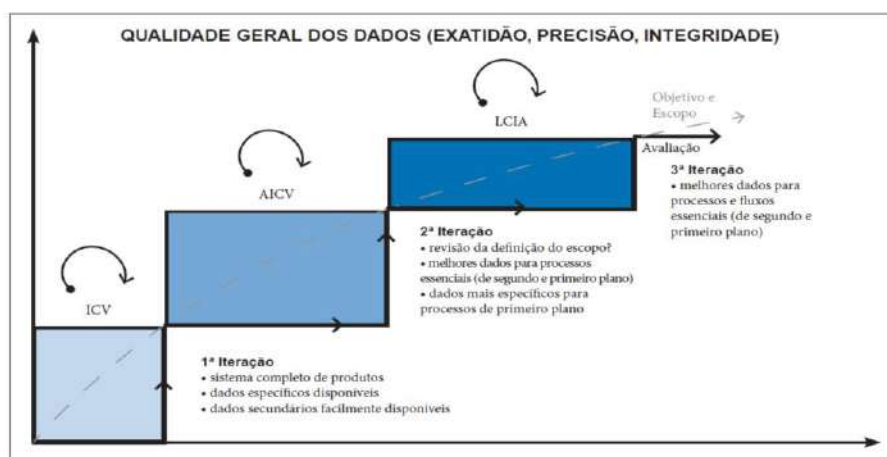
Fonte: (UNEP; SETAC, 2007)

O ciclo de vida do produto é ilustrado na figura 15 e abrange desde a extração de recursos para geração da matéria-prima, passando pela produção do produto, uso, tratamento pós-uso, reciclagem e disposição final. A partir dos resultados da aplicação da ACV, é possível identificar oportunidades em diferentes etapas dos processos, visando melhorias de aspectos ambientais (SILVA; KULAY, 2006).

A metodologia tem recebido destaque com a crescente conscientização ambiental e busca por produtos mais sustentáveis, sendo capaz de auxiliar na compreensão dos impactos e, por consequência, apoiar as tomadas de decisões. Ela avalia os impactos causados pela função do produto dentro da cadeia de produtividade ao longo do seu ciclo de vida (NBR ISO 14044:2009; COLTRO, 2007; SILVA; KULAY, 2006). Além disso, a ACV pode ser utilizada para comparar diferentes produtos que possuem a mesma função, estabelecida pela unidade funcional (IBICT, 2014).

A técnica é caracterizada por ser relativa, iterativa e com foco principal em aspectos ambientais. A abordagem relativa se dá pela estruturação em torno de uma unidade funcional, que define o objeto de estudo e assegura que todas as entradas e saídas dos inventários estejam relacionadas a essa unidade, garantindo, assim, consistência nos resultados. Já a característica iterativa decorre do uso dos resultados individuais de cada fase do ciclo de vida, o que permite a integração entre as fases e reforça a coerência do estudo. Embora o enfoque principal da ACV seja nos impactos ambientais, a técnica também permite a inclusão de alguns aspectos sociais e econômicos para análises mais abrangentes (NBR ISO 14044:2009).

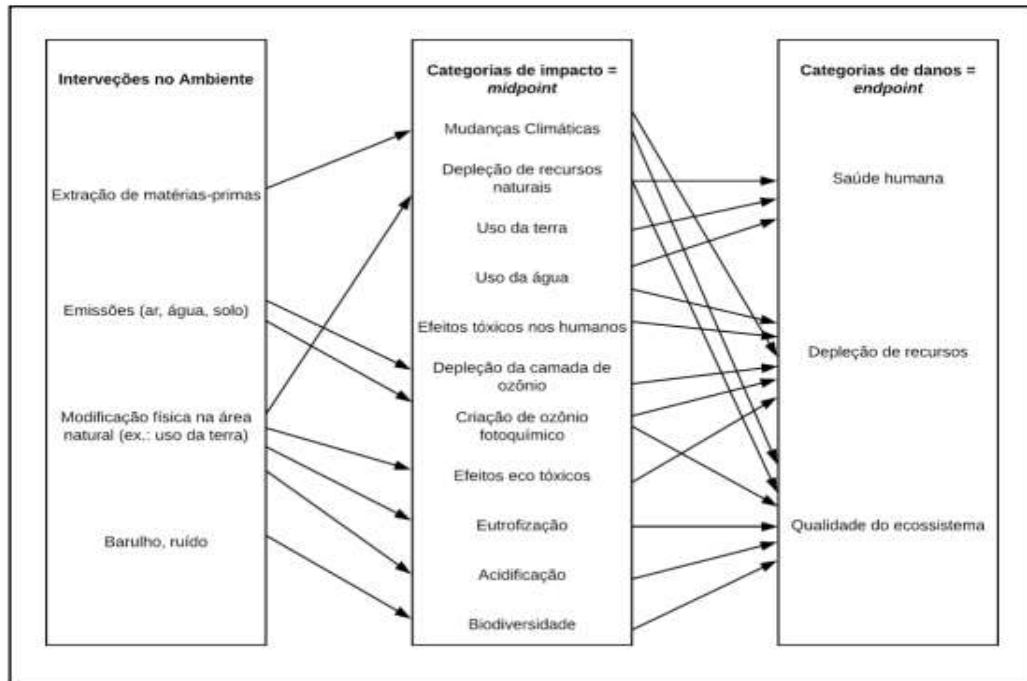
Figura 16 - Natureza iterativa da ACV.



Fonte: Guia ILCD

Dentre as abordagens da Avaliação do Ciclo de Vida, destacam-se as metodologias do berço ao portão (*cradle-to-gate*) e do berço ao túmulo (*cradle-to-grave*). A abordagem do berço ao portão avalia as etapas desde a extração de recursos naturais até a produção do produto, incluindo o transporte relacionado a essas fases, mas excluindo o uso e o descarte final (WRI; WBCSD, 2010). Por outro lado, a abordagem do berço ao túmulo considera todo o ciclo de vida do produto, abrangendo desde a extração de recursos até o descarte final, incluindo transporte, uso e reciclagem (Athena Institute; National Renewable Energy Laboratory, 2010). Essas abordagens permitem adaptações conforme o objetivo e o escopo do estudo, assegurando análises consistentes e adequadas às necessidades específicas de cada aplicação.

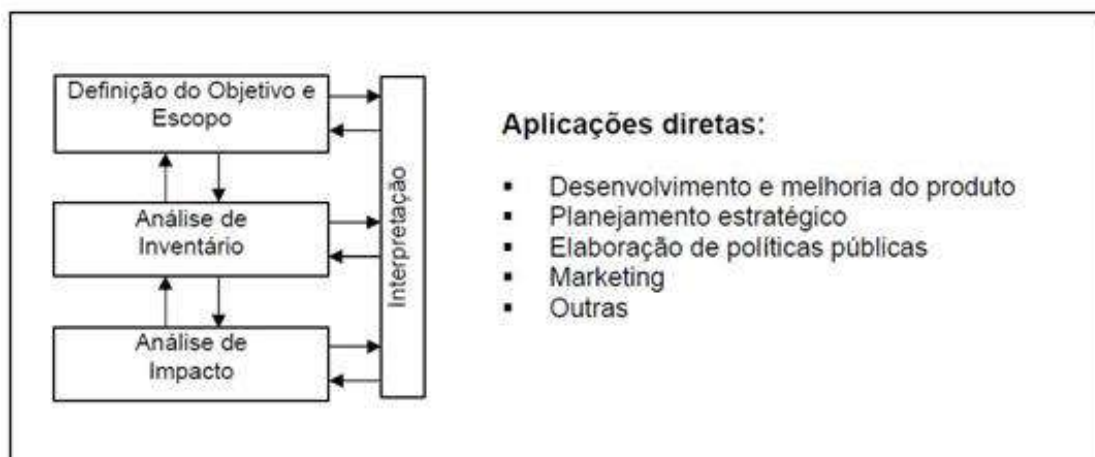
As categorias de impacto ambiental são classificadas em dois níveis: midpoint e endpoint. As categorias midpoint se concentram em impactos intermediários, como potencial de aquecimento global, acidificação e eutrofização, restringindo-se aos estágios iniciais da corrente de causa e efeito para minimizar incertezas. Já as categorias endpoint são focadas nos danos finais, modelando os impactos até afetarem diretamente áreas de proteção, como saúde humana, qualidade dos ecossistemas e recursos naturais (RODRIGUES, 2017; SAADE; SILVA; GOMES, 2014). Esse diferencial entre midpoint e endpoint permite análises com distintos graus de precisão e abrangência, conforme a finalidade do estudo.



Fonte: Adaptado de UNEP (2011).

Estruturalmente, um estudo de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é dividido em quatro fases principais: i) definição de objetivo e escopo, ii) análise de inventário, iii) avaliação de impactos e iv) interpretação. Softwares como SimaPro, GaBi, Umberto e OpenLCA facilitam a condução do estudo, organizando dados, executando cálculos e inferindo resultados. Essas ferramentas também permitem o vínculo entre as diferentes fases, assegurando que o fluxo de informações e análises seja integrado e consistente ao longo do processo.

Figura 18 - Estrutura de Avaliação do Ciclo de Vida



Fonte: NBR ISO 14040:2001

A primeira fase da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) consiste na definição do objetivo e do escopo do estudo. Essa etapa é fundamental, pois delimita as especificações do sistema de produto e da unidade funcional, além de determinar o nível de detalhamento e a abrangência da análise (SILVA; KULAY, 2010). O sistema de produto compreende as operações em cada estágio do ciclo de vida, para as quais são necessários dados de entrada e saída, geralmente relacionados à matéria e energia. A unidade funcional, por sua vez, serve como referência para quantificar o desempenho do sistema de produto, normatizando os dados com base em seu valor mensurável (NBR ISO 14044:2009).

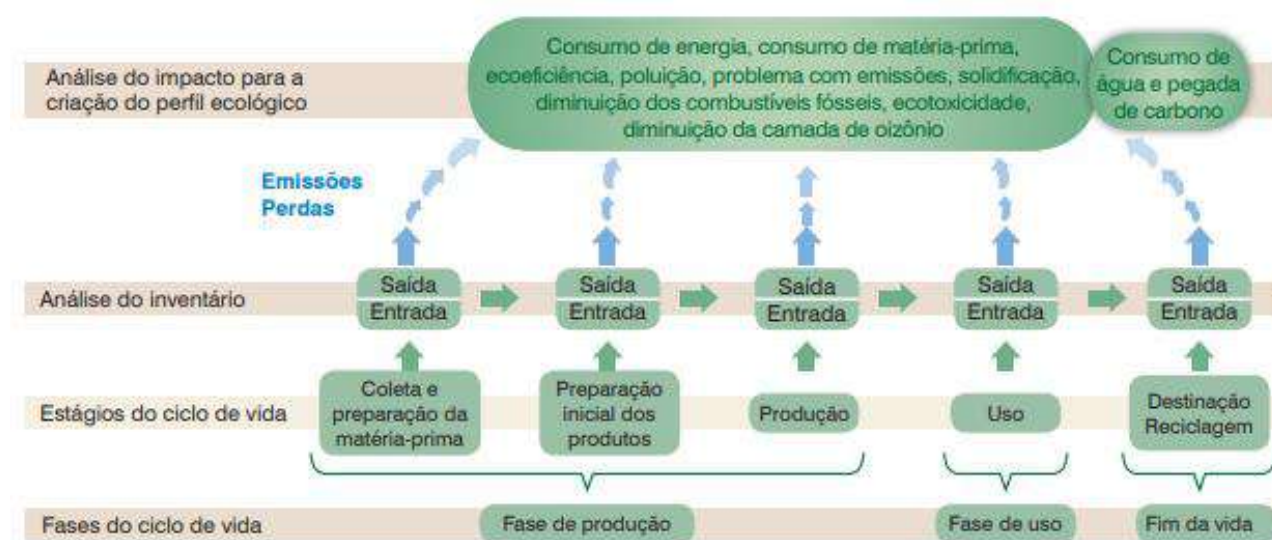
A segunda fase é a de análise de inventário de ciclo de vida (ICV), em que os dados de entrada e saída do sistema de produto são coletados e calculados com base no objetivo e unidade funcional do estudo, admitindo que não há perdas mássicas e energéticas (IBICT, 2013). Nessa fase, é comum o uso de base de dados para os itens e processos em que não temos dados primários, sendo a *Ecoinvent* uma das mais utilizadas por pesquisadores e empresas para avaliar o desempenho ambiental de produtos e sistema (ECOINVENT, 2024).

A terceira fase é a de análise de impacto de ciclo de vida (AICV), na qual há a identificação e quantificação dos impactos ambientais potenciais, referentes aos dados do inventário obtido na etapa anterior. Nessa fase, métodos são utilizados para calcular o impacto ambiental em diferentes categorias, como mudanças climáticas, eutrofização aquática marinha, consumo de recursos, depleção de ozônio, formação de matéria particulada e ecotoxicidade,

entre outras (Joint Research Centre, 2010; Goedkoop *et al.*, 2009). Alguns dos métodos mais utilizados são o ReCiPe, CML, Eco-indicator 99, TRACI, USEtox, LUCAS e Impact 2002+, que permitem avaliar esses impactos em várias categorias ambientais (MENDES; BUENO; OMETTO, 2016).

O método ReCiPe possui aplicação global para a categoria de impacto relacionada às mudanças climáticas (MENDES; BUENO; OMETTO, 2016). A unidade empregada nessa categoria é a de Kg de CO_{2eq}, na qual é utilizado como fator de caracterização o potencial de aquecimento global dos gases de efeito estufa. Dessa forma, impactos como a pegada de carbono podem ser quantificados.

Figura 19 - Avaliação do Ciclo de Vida



Fonte: (IBICT, 2012).

A última fase da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é a interpretação. Essa etapa envolve a análise dos resultados para concluir o estudo, incluindo a avaliação da qualidade dos dados, das referências utilizadas e da delimitação do sistema, a fim de garantir a consistência e sensibilidade dos resultados. Com isso, é possível formular conclusões, fazer recomendações e tomar ações que estejam alinhadas com o objetivo e o escopo definidos no início do estudo.

Uma das aplicações da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é o cálculo da pegada de carbono de produtos, que quantifica as emissões de gases de efeito estufa ao longo de todas as etapas do ciclo de vida do produto (ACV BRASIL, 2024). Essa análise permite identificar etapas críticas e implementar estratégias eficazes para a redução de emissões, alinhando-se às diretrizes ambientais.

Além disso, a ACV pode ser utilizada para comparar os impactos ambientais de produtos com a mesma função, promovendo decisões baseadas em critérios objetivos e consistentes. Dessa forma, a técnica auxilia organizações a identificar oportunidades de melhoria, adotar escolhas mais sustentáveis e contribuir para a mitigação de impactos climáticos.

3 METODOLOGIA

A metodologia utilizada neste trabalho foi a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) comparativa, seguindo diretrizes das normas ABNT NBR ISO 14040 e ABNT NBR ISO 14044, utilizando o software openLCA.

A ACV foi realizada para comparar a pegada de carbono de dois fertilizantes, o biofertilizante de *Arthrospira sp.* cultivada em efluente de cervejaria industrial e o fertilizante sintético, NPK (5-20-20), buscando verificar a se há redução com a substituição do fertilizante sintético pelo biofertilizante. A análise corresponde um estudo “do berço ao portão”, considerados sistemas produtivos e de transporte até o local de aplicação. As emissões em campo não foram incluídas nessa análise.

3.1. Definição de Unidade Funcional

A unidade funcional foi definida como 1 Kg de fertilizante produzido e distribuído para a fazenda onde será cultivada a cevada, correspondendo a 1 Kg de biofertilizante de biomassa de *Arthrospira sp.* ou 1 kg de fertilizante NPK (5-20-20).

Essa escolha baseou-se no pressuposto de que o biofertilizante não foi caracterizado, ou seja, sua composição exata é desconhecida. No entanto, no cultivo de cevada descrito no artigo de referência, foi realizada a substituição completa do fertilizante sintético pelo biofertilizante. Assim, assumiu-se que ambos desempenham a mesma função nesta análise.

3.2. Definição dos Limites do Sistema

Os limites do sistema são definidos através da abordagem “do berço ao portão” e são consideradas as etapas produtivas e de transporte. Dessa forma, incluem desde a extração das matérias primas utilizadas no processo de produção, os gastos energéticos do processo, infraestrutura produtiva e o transporte dos fertilizantes até o local de aplicação.

3.3. Análise de Inventário de Ciclo de Vida

Foi utilizado o software open source openLCA, que consegue tratar os dados do inventário e utilizar metodologias de impacto ambiental para inferir as análises de ciclo de vida. Os dados do inventário foram obtidos através de dados primários experimentais referentes aos processos de produção do biofertilizante, descritos no item 3.3.1. e dados secundários da base *ECOINVENT 3.8*, cutoff, unit.

3.3.1. Biofertilizante

O biofertilizante estudado neste trabalho foi produzido a partir do cultivo da *Arthrospira sp.* em sistema aberto, no Parque Tecnológico da Universidade Federal do Rio de Janeiro, utilizando efluentes industriais da Cervejaria Nova Rio, presente no estado do Rio de Janeiro, na região sudeste do Brasil, no projeto entre o LEAF e a AMBEV, conforme descrito no item de contextualização.

O cultivo das microalgas do projeto foi conduzido em escala piloto durante 100 dias. Foi realizado em tanque aberto, em *raceway ponds* de 1,55 m² área e capacidade nominal de 1 m³, localizado no Parque Tecnológico da UFRJ, na cidade do Rio de Janeiro. A agitação foi garantida por uma roda de pás, proporcionando circulação constante da água a uma velocidade de aproximadamente 0,15 m/s. O volume inicial de trabalho utilizado foi de 300 L, referente a 50% de efluente bruto e 50% de inóculo de *Arthrospira sp.* doado pelo LEAF, com variação da coluna d'água entre 15 cm e 25 cm. O cultivo foi exposto a temperaturas naturais variando entre 17 °C e 29 °C, com intensidade luminosa que atingiu até 1.500 µmol photons/m²/s. O pH foi mantido entre 8,8 e 9,5, enquanto a salinidade aumentou de 0,6‰ para 5,5‰ ao longo do experimento.

Figura 20 - Cultivo de *Arthrospira* sp. e secagem da biomassa



Fonte: Arthur Santos, LEAF (2024)

A cada sete dias, aproximadamente 105 L de cultivo eram retirados, com o volume sendo repostado por efluente bruto proveniente da ETE da cervejaria. Após a colheita, o volume removido passava por filtração, e a biomassa era levada para secagem ao sol em uma bandeja de policarbonato por cerca de 48 horas antes de ser utilizada na formulação de biofertilizantes. Esse processo resultou em uma produtividade média de $10,68 \pm 5,13$ g/m²/dia (SILVA *et al.*, 2024). O biofertilizante produzido foi aplicado no cultivo de cevada em Passo Fundo, no estado do Rio Grande do Sul, na região sul do Brasil.

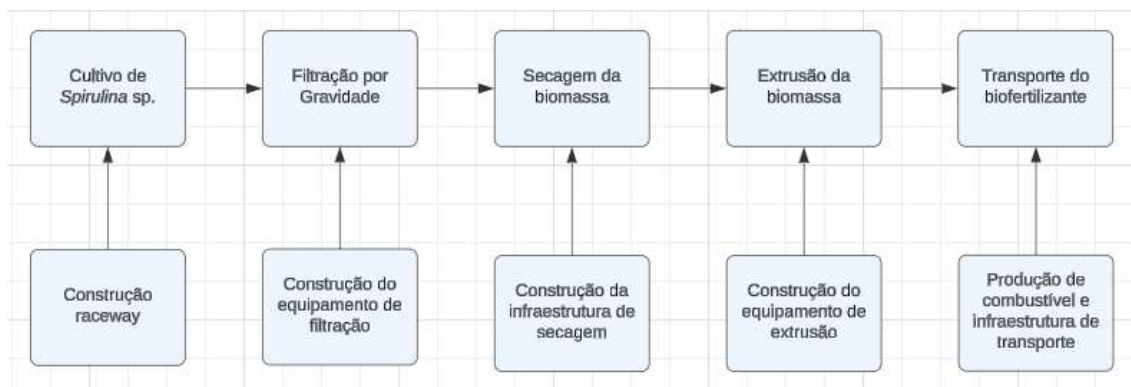
Figura 21 – Região de Passo Fundo, RS.



Fonte: Wikipédia.

Considerando as características do biofertilizante, o inventário de ciclo de vida do mesmo foi dividido nas seguintes etapas: cultivo da microalga, filtração e secagem da biomassa, extrusão da biomassa e transporte do biofertilizante.

Figura 22 – Fluxograma da modelagem de produção e transporte do biofertilizante.



Fonte: elaboração própria.

3.4. Avaliação de Impacto Ambiental

O impacto ambiental determinado para estudo foi o potencial de aquecimento global relacionado a produção e o transporte dos fertilizantes, tanto o biofertilizante quanto o NPK. A metodologia de quantificação do impacto utilizada foi a ReCiPe 2016, Midpoint (H), em que as emissões de GEE são caracterizadas em termos de Kg de CO₂-eq, considerando o potencial de aquecimento global (GWP) dos diferentes gases de efeito estufa envolvidos em cada sistema de produto que relaciona todas as etapas de processo para geração da unidade funcional avaliada.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Análise de Inventário

4.1.1 Cultivo

Nesta etapa, foram analisadas a construção da infraestrutura para o cultivo e sua operação. Para isso, o *raceway ponds* foi modelado, e seu gasto energético foi considerado. A construção do *raceway*, feito de fibra de vidro, foi simulada no software openLCA e utilizando os dados da *Ecoinvent 3.8* para o material, considerando uma vida útil de 10 anos. A quantidade de material foi estimada com base na área e na capacidade do sistema, levando em conta as especificações da fibra de vidro, como espessura média de 5 mm e densidade de 2500 kg/m³. Também foi incluída a área necessária para o manejo e instalação do equipamento.

Na operação, o consumo energético do paddle wheel foi determinado a partir do artigo “Energy balance and life cycle assessment of a microalgae-based wastewater treatment plant: A focus on alternative biogas uses” de Lopes et al. (2018), que aponta um consumo médio de 0,72375 Wh/dia. A adição de inóculo ocorreu apenas no início do projeto, com 105 L iniciais, enquanto, semanalmente, 105 L de cultivo eram retirados e substituídos pelo mesmo volume de efluente bruto de cervejaria. Assim, a quantidade de inóculo foi considerada desprezível ao longo do processo completo.

Por fim, foi incluído o valor teórico de captura de dióxido de carbono atmosférico pela fotossíntese da espécie *Arthrospira sp.*, estimado em cerca de 1,8 g de CO₂ por grama de biomassa gerada (ZHU et al., 2020).

4.1.2 Filtração e Secagem

Com o objetivo de utilizar o mínimo de energia possível, o processo de filtração do efluente rico em biomassa foi feito a partir da gravidade, utilizando uma peneira de aço inox de 0.08 mm de abertura, com 30 cm de diâmetro e espessura estimada de 1mm. A construção da

peneira foi modelada a partir do material de aço inox contido na base *Ecoinvent 3.8*, considerando um tempo de vida útil de 10 anos e a densidade média do aço inoxidável de 8000 Kg/m³.

Após a filtração, o efluente sai tratado e a biomassa molhada passa por um processo de secagem via luz solar. Entretanto, vislumbrando um aumento de escala e não dependência do clima, foi realizada a modelagem do processo de secagem a partir da base *Ecoinvent 3.8*, considerando a operação “operation, dried roughage store, air dried, solar”, que inclui gastos com infraestrutura de armazenamento e consumo de energia elétrica do grid necessária ao processo. Após essa etapa, a biomassa seca é obtida.

4.1.3 Processo de extrusão

A biomassa seca de *Arthrospira* sp. foi processada em uma extrusora adaptada para a formulação do biofertilizante. Devido à ausência desse processo específico na base de dados *Ecoinvent 3.8*, foi necessário modelá-lo. Para isso, foi utilizado o processo de extrusão de filmes plásticos da base como referência, ajustando-o para a realidade do projeto. Foi descontada a geração de resíduos plásticos originalmente presente no modelo, pois não condiz com a operação realizada.

O consumo energético da extrusora em escala piloto foi incluído na modelagem, com um valor de 5,372 W/kg (via comunicação direta). Além disso, os dados de eletricidade de média tensão provenientes do grid do sudeste brasileiro foram incorporados, garantindo uma aproximação coerente para a análise.

Nessa etapa, considerou-se que não houve perdas de biomassa durante o processo, ou seja, toda a biomassa seca foi utilizada na extrusão. Também não foram adicionados outros aditivos, assumindo que o biofertilizante é composto exclusivamente de biomassa de *Arthrospira* sp. neste estudo.

4.1.4 Transporte do Biofertilizante para o campo

O transporte do biofertilizante foi modelado considerando uma distância de 1400 km entre o local de produção, no Rio de Janeiro, e o campo de cevada, localizado no Rio Grande do Sul. O frete foi simulado utilizando caminhões com capacidade de 16 a 32 toneladas métricas, considerando as normas EURO 4 que são a quarta iteração dos padrões de emissão definidos pela União Europeia (UE) para automóveis, e que incorpora dados coerentes sobre o transporte na malha rodoviária brasileira (via comunicação direta).

4.2. Fertilizante NPK

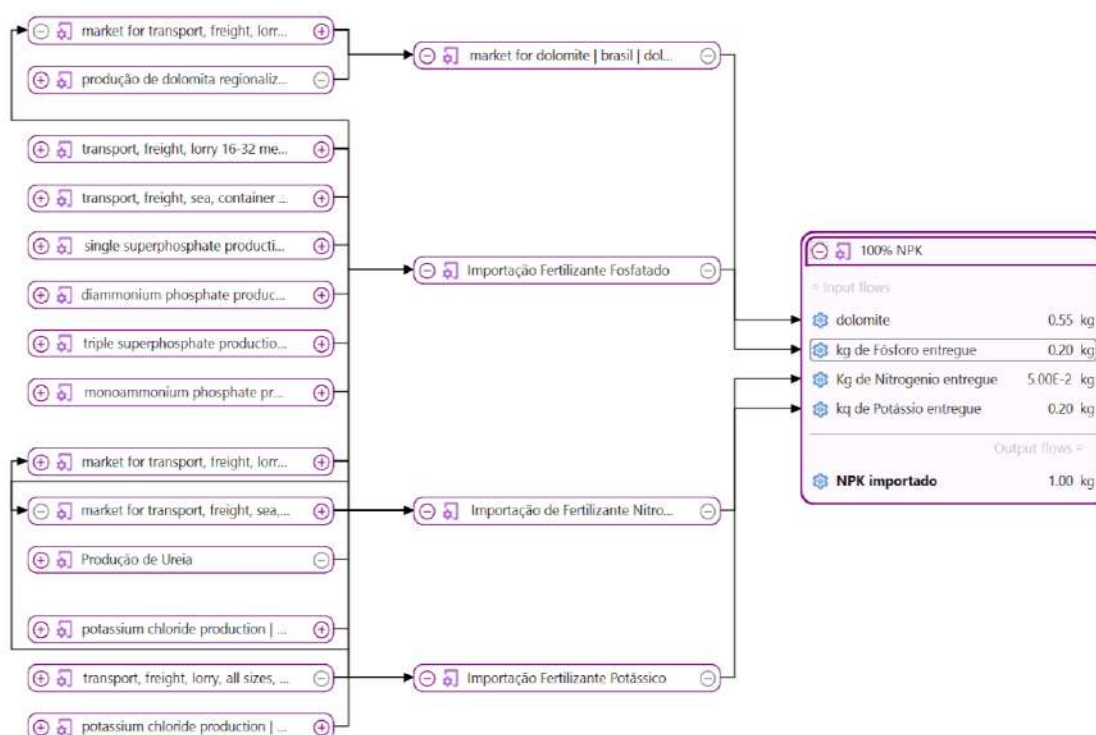
A proporção do NPK estudado foi indicada via comunicação direta pelos produtores de cevada na região de Passo Fundo, RS, como NPK (5-20-20). A composição restante não foi especificada, portanto, foi representada pelo mineral dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), amplamente utilizado como componente adicional em fertilizantes. A dolomita complementa as contribuições de nitrogênio, fósforo e potássio, além de fornecer cálcio e magnésio, e possui potencial para corrigir a acidez do solo (Polovyy et al., 2023).

De acordo com o Plano Nacional de Fertilizantes (PNF), o Brasil importa aproximadamente 85% dos fertilizantes químicos. Assim, foi adotada como premissa no estudo que toda a contribuição de N, P e K é de origem externa, considerando apenas a produção nacional de dolomita. Essa abordagem torna a comparação com o biofertilizante nacional produzido mais consistente, ao considerar a origem de todas as matérias-primas envolvidas. No entanto, a análise não inclui o gasto energético dos misturadores de fertilizantes mistos, limitando-se à contribuição de cada componente para a formulação do fertilizante.

Com o software openLCA foi possível modelar o processo produtivo de 1 Kg do fertilizante NPK, como unidade funcional especificada, a partir da sua composição. Para isso, a fim de sistematização de dados, cada componente foi modelado de forma a gerar 1 Kg de sua

composição. Por sua vez, o software permite a utilização desses dados para analisar a unidade funcional determinada, seguindo a proporção: 5% de N, 20% de P, 20% de K, 55% de dolomita.

Figura 23 – Distribuição das contribuições do fertilizante NPK no software openLCA.



Fonte: elaboração própria utilizando o OpenLCA.

4.2.1. Contribuição de Fertilizante Nitrogenado do NPK

Nesse estudo, foi considerado que toda a contribuição de nitrogênio presente no fertilizante NPK utilizado é oriunda da ureia importada para Brasil, visto que cerca de 76% da ureia utilizada no Brasil é importada (Outlook GlobalFert,2024). Os países de origem são: Rússia, Egito, Catar, Venezuela, Bahrein, Emirados Árabes, Irã, Argélia, Kuwait, Arábia Saudita, Nigéria e Omã (Outlook GlobalFert,2024).

Foi realizada a modelagem no software OpenLCA para geração de 1 Kg de Nitrogênio entregue ao campo de cevada considerando as diferentes localizações dos processos produtivos e o transporte associado.

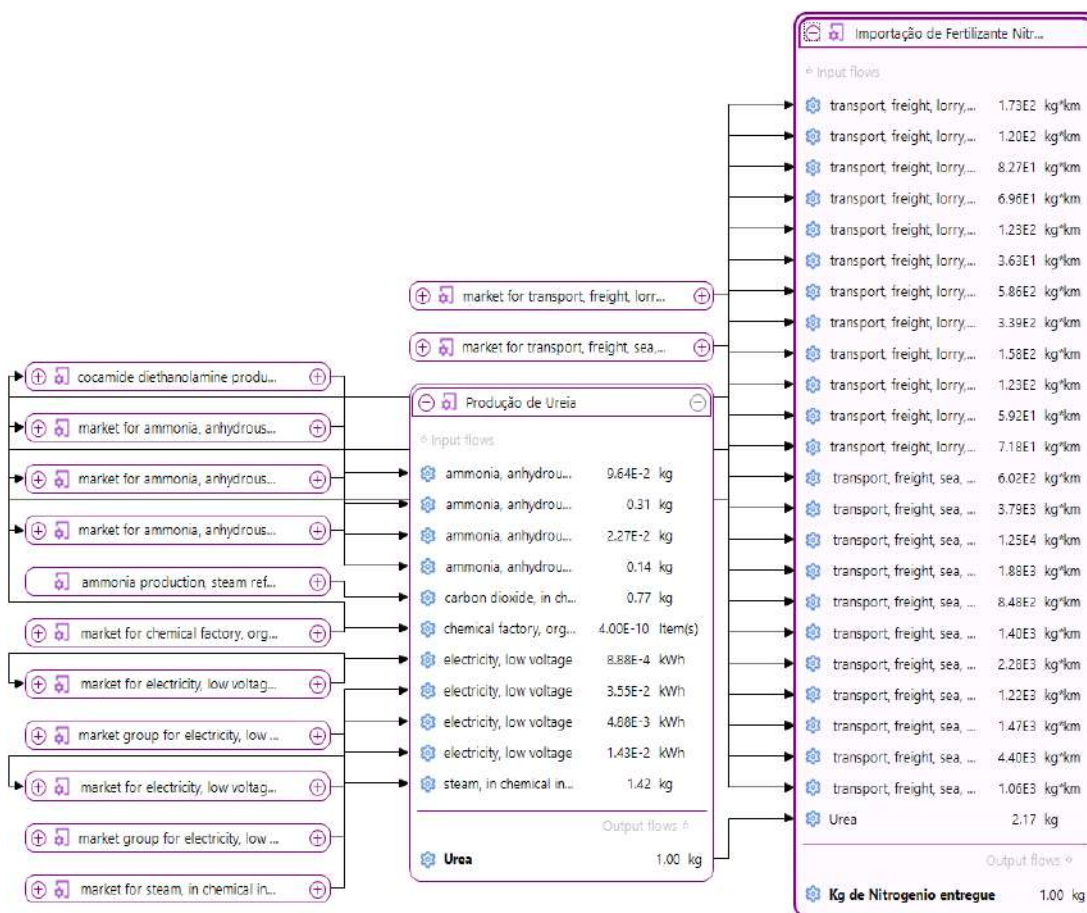
Para a modelagem de produção de ureia, foram considerados os dados de infraestrutura, de eletricidade e vapor para produção da amônia, com adaptação para os parâmetros de consumo energético variável pela localidade. A base de dados utilizada, Ecoinvent 3.8, possui valores específicos para os processos na Rússia e Venezuela, por isso, para os outros países foi utilizado o valor médio global.

A ureia produzida é transportada para o Brasil via combinação de transporte marítimo e rodoviário, considerando as diferentes localidades, rotas e suas respectivas distâncias até o Brasil. O site Fluente Cargo foi usado como fonte de dados para determinar as distâncias e rotas utilizadas. No modelo foi considerado a porcentagem de origem, referente a cada país, do produto importado para o Brasil, de forma que essas proporções foram consideradas no modelo para calcular o impacto total do transporte. Em geral, o impacto possui fatores importantes de quantificação que são: peso, distância, modal de transporte e combustível utilizado.

O transporte rodoviário foi modelado utilizando o processo "transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO 4" da base *Ecoinvent 3.8* e os dados de distância percorrida por esse tipo de modal na rota determinada pelo site da Fluente Cargo. Este processo inclui as emissões associadas ao transporte por caminhões movidos a óleo diesel de baixo enxofre que seguem o padrão EURO 4.

Já o transporte marítimo utilizado foi modelado utilizando o processo "transport, freight, sea, container ship" da base *Ecoinvent 3.8* e a distância percorrida pela rota demonstrada no site da Fluente Cargo. Este processo cobre as emissões associadas ao transporte marítimo em navios porta-contêineres movidos a óleo combustível pesado.

Figura 24 – Informações gerais da produção e transporte do fertilizante nitrogenado.



Fonte: elaboração própria a partir do OpenLCA

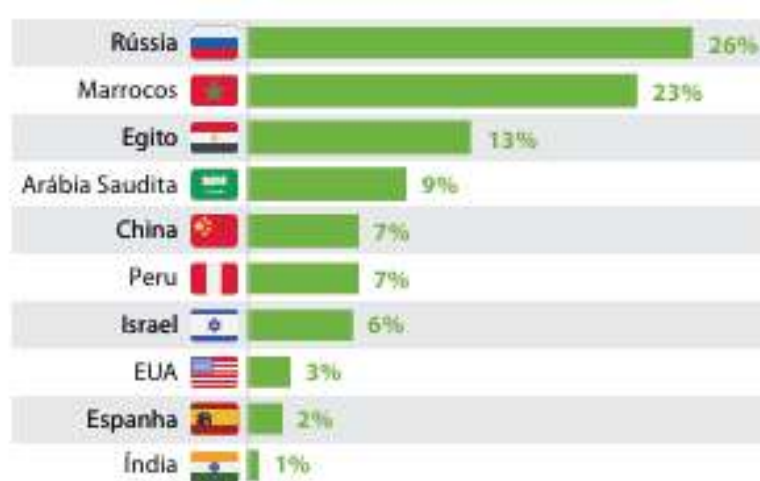
4.2.2. Contribuição de Fertilizante Fosfatado do NPK

Nessa etapa, o processo foi modelado visando a obtenção de 1 Kg de fósforo entregue no Brasil a partir do fertilizante fosfatado importado. O fósforo é oriundo do fosfato (P_2O_5), cuja fonte varia em: fosfato monoamônico (MAP), fosfato diamônico (DAP), superfosfato simples (SSP) e superfosfato triplo (TSP). Dessa forma, os dados de inventário consideram a proporção de cada fonte de fosfato importada, a infraestrutura produtiva e o seu local de origem, considerando os diferentes gastos energéticos.

A quantidade de fósforo utilizadas foram referentes de 57,5% de MAP, 2,7% de DAP, 24,3% de SSP e 15,5% de TSP, todos baseados na quantidade de importação de cada um indicado pela GlobalFert (2024). Nessa análise, não foi contabilizada a quantidade de nitrogênio de MAP e DAP no fertilizante (5-20-20) por representarem apenas 11% e 18% de N, respectivamente.

O transporte do fertilizante fosfatado também foi modelado considerando as proporções de importação de origem, com combinação entre transporte rodoviário e transporte marítimo até a chegada ao Brasil através das rotas determinadas pela Fluent Cargo. Nesse estudo, será considerado os principais países de origem de fosfatados para o Brasil, sendo eles: Rússia, Marrocos, Egito, Arábia Saudita, China, Peru, Israel, EUA, Espanha, Índia (Outlook GlobalFert, 2024).

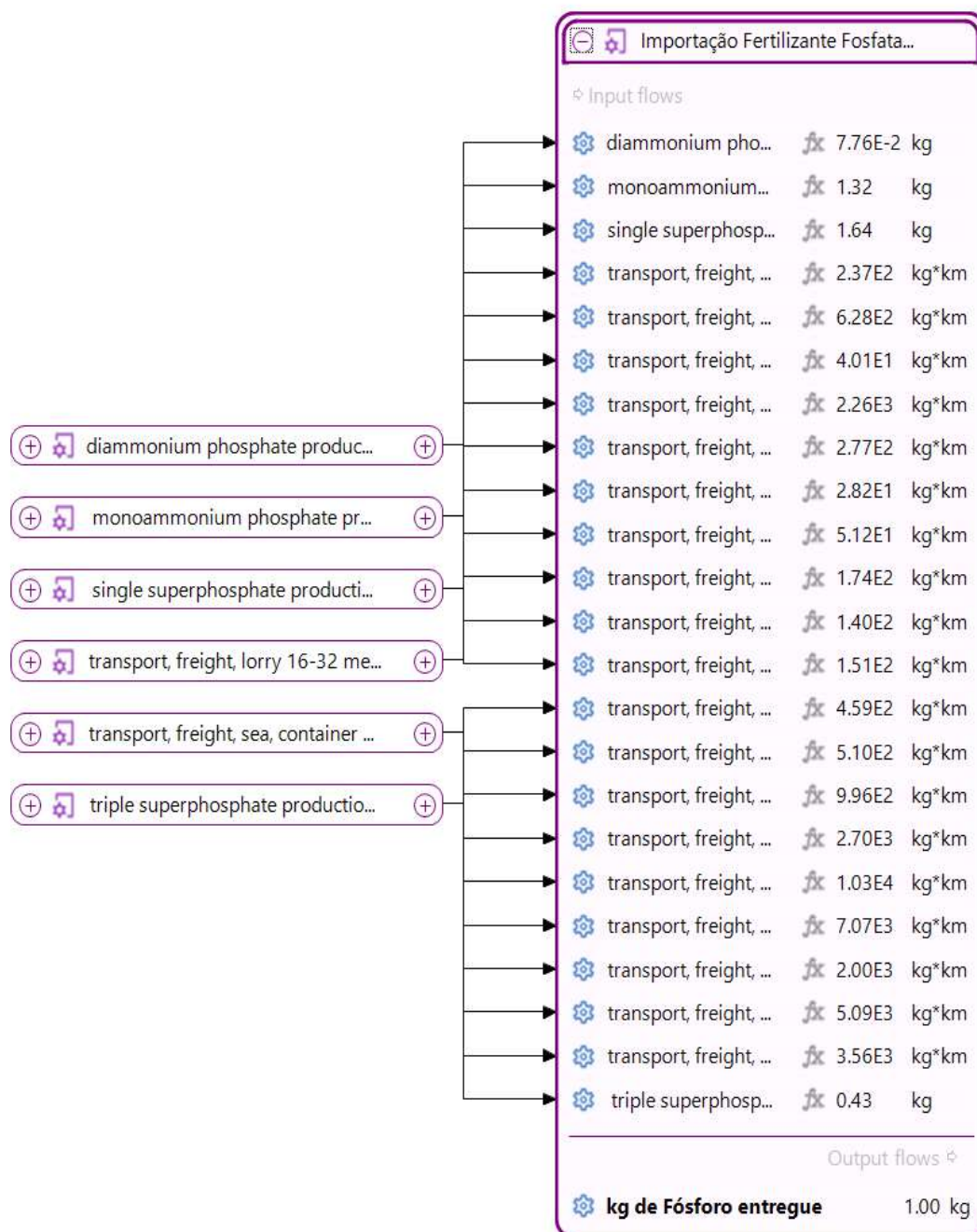
Figura 25 – Principais origens de fosfatados para o Brasil.



Fonte: GlobalFert 2024

Os modais de transporte foram modelados seguindo o mesmo modelo utilizado para o fertilizante nitrogenado, com adaptação das distâncias e proporções de importação pelo Brasil aos países de origem.

Figura 26 – Informações gerais da produção e transporte dos fertilizantes fosfatados.



Fonte: elaboração própria a partir do OpenLCA

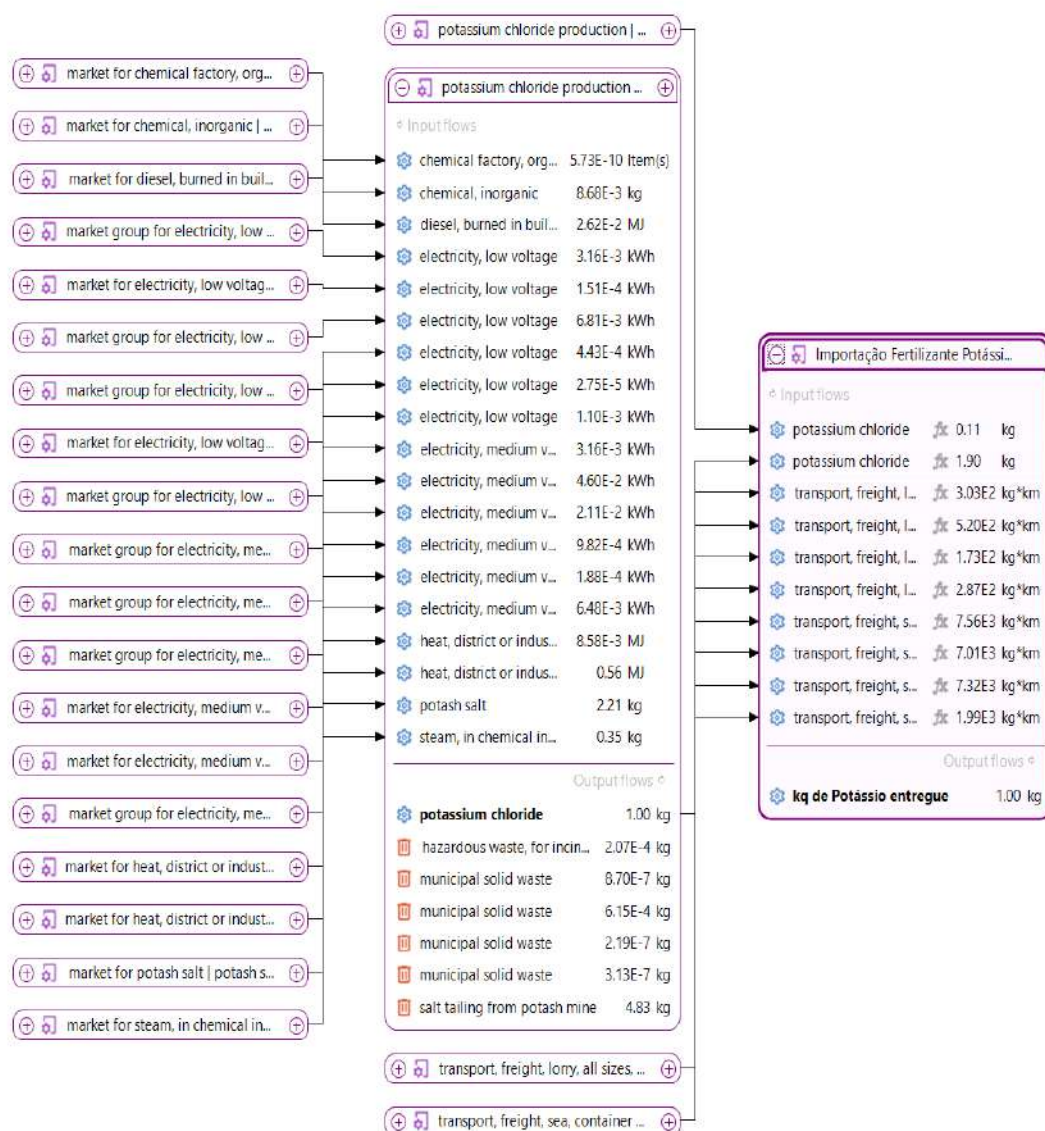
4.2.3 Contribuição de Fertilizante Potássico do NPK

A modelagem para a obtenção de 1 Kg de potássio entregue ao campo de cevada foi realizada considerando o cloreto de potássio (KCl) como única fonte de potássio importado. Essa aproximação é válida pois corresponde a 90% da produção de fertilizantes potássicos (GLOBALFERT, 2024).

Os países de origem são: Canadá, Alemanha, Israel e Rússia. Para este estudo, os dados de inventário foram obtidos da base de dados *Ecoinvent 3.8*, que incluem as emissões associadas a infraestrutura, processo produtivo e, principalmente, o consumo energético. Nesse caso, a base fornece dados específicos para a produção de KCl na Alemanha, enquanto para as outras localidades, foi utilizado valores referentes a Rest-of-the-World (RoW), ou seja, dados de produção global média.

O transporte do fertilizante potássico foi modelado seguindo a mesma lógica dos fertilizantes nitrogenados e fosfatados, considerando a porcentagem de importação dos diferentes países e suas respectivas distâncias até o Brasil. Além disso, para o impacto total do transporte também foi considerado os mesmos modais de transporte rodoviário e marítimos, com o mesmo tipo de combustível e origem de banco de dados.

Figura 27 – Informações gerais da produção e transporte dos fertilizantes potássicos.



Fonte: elaboração própria a partir do OpenLCA

4.2.4. Contribuição da Dolomita para o NPK

A dolomita é um mineral amplamente utilizado na agricultura como corretivo de solo e componente de fertilizantes. Nessa etapa, foi realizada a modelagem no software OpenLCA

para geração de 1 Kg de Dolomita a ser entregue ao campo de cevada considerando as origens de produção do componente no Brasil e o seu transporte até o campo no Rio Grande do Sul.

Foi considerado que a dolomita é produzida no Brasil nos estados de Minas Gerais, Bahia, São Paulo, Paraná, Goiás e Espírito Santo (ANUÁRIO MINERAL BRASILEIRO, 2010). Os dados da modelagem do processo produtivo da dolomita são da *Ecoinvent 3.8*, a partir dos parâmetros de RoW adaptados para os gastos energéticos da matriz brasileira. Nesse processo, são incluídos fatores como infraestrutura da pedreira de dolomita, maquinário industrial pesado com o gasto de diesel utilizado, além de atividades realizadas em uma mina de dolomita. Esta abordagem permite uma modelagem robusta do impacto ambiental associado ao processo produtivo.

Tabela 3 – Contribuição dos estados brasileiros na produção de Dolomita.

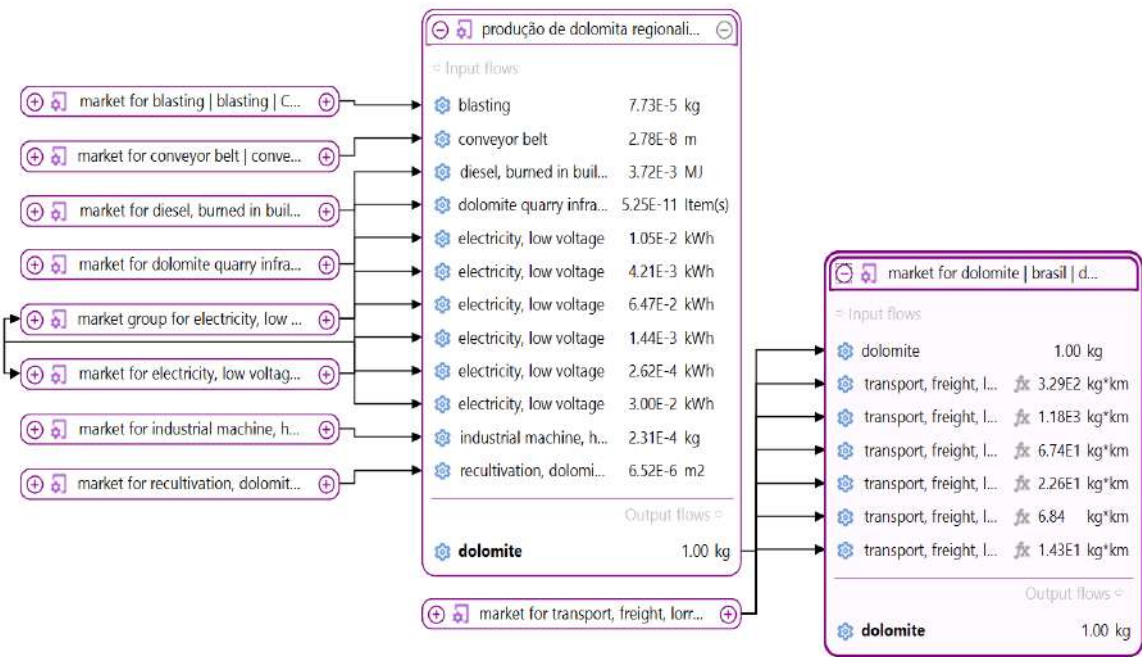
Países	Proporção (%)	Distância até Passo Fundo (Km)
Minas Gerais	76,1	1.550
Bahia	13,7	2.400
São Paulo	6,1	1.100
Paraná	2,2	650
Goiás	1,4	1.550
Espírito Santo	0,5	1.800

Fonte: Anuário Mineral Brasileiro de 2010; Distâncias determinadas pelo Google Maps.

Para a modelagem do transporte foi considerado o percentual de produção de cada estado e as distâncias até o campo de cevada para aplicação do fertilizante. Para fins de simplificação, as distâncias foram determinadas a partir da capital de cada estado até a cidade

de Passo Fundo, calculadas utilizando a ferramenta Google Maps. Além disso, foram utilizados os dados da *Ecoinvent 3.8* para o transporte rodoviário, sendo um caminhão à diesel de 16-32 toneladas métricas, amplamente usado no Brasil, seguindo as especificações EURO 4, cujo consumo de combustível e quantificação de gases são coerentes para a frota brasileira.

Figura 28 – Informações gerais da produção e transporte da dolomita.

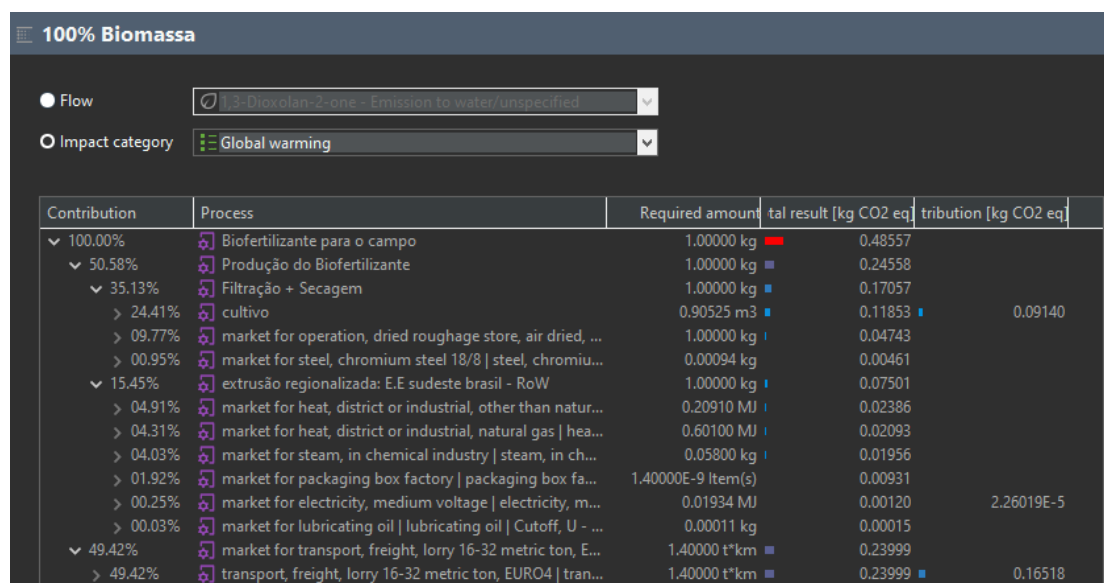


Fonte: elaboração própria a partir do OpenLCA

4.3. Avaliação de Impacto Ambiental

Após ser aplicado à metodologia ReciPe, as contribuições de cada etapa do sistema de produto, chamada de contribution tree, são determinadas. Neste caso, para o sistema referente ao biofertilizante estão representados na Figura 29, enquanto para o fertilizante NPK está ilustrado na figura 30.

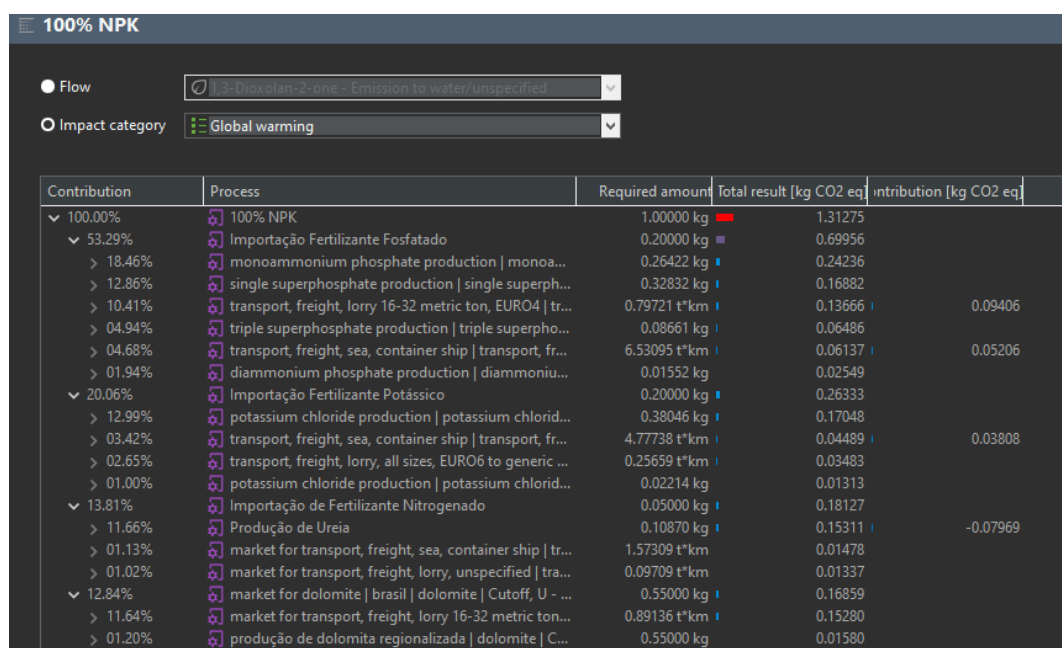
Figura 29 – Contribution tree do sistema de produto da produção e transporte do biofertilizante feito com 100% de biomassa para o campo de cevada.



Fonte: elaboração própria a partir do OpenLCA

As contribuições do sistema de biofertilizantes indicam que sua produção e transporte até o local de aplicação resultam em emissões de 0,48557 kg de CO₂-eq/Kg de Biofertilizante. Nesta análise, o transporte considera apenas a entrega do fertilizante em sua forma final ao destino, desconsiderando etapas de transporte indiretas relacionadas à aquisição de matérias-primas, insumos e equipamentos. Assim, verifica-se que 50,6% das emissões estão associadas ao transporte, enquanto 49,4% são provenientes da etapa produtiva.

Figura 30 – Contribution tree do sistema de produto da produção e transporte de fertilizante 100% NPK para o campo de cevada.



Fonte: elaboração própria a partir do OpenLCA

No sistema do fertilizante NPK (5-20-20), a emissão total é de 1,31275 kg de CO₂-eq/kg de fertilizante, sendo 53,29% provenientes da contribuição fosfatada, 20,06% dos potássicos, 13,81% dos nitrogenados e 12,84% da dolomita.

Do total de emissões, 64,8% estão associados à etapa de produção, enquanto 35,2% são referentes ao transporte, evidenciando que a produção apresenta a maior pegada de carbono.

Ao analisar as contribuições individuais:

- Nos fertilizantes fosfatados, 28,8% das emissões decorrem do transporte, enquanto 71,2% provêm da produção.
- Para os fertilizantes potássicos, 30,27% das emissões estão associadas ao transporte e 69,73% à produção.
- Já nos fertilizantes nitrogenados, o transporte representa 15,53% das emissões, enquanto 84,47% provêm da produção, caracterizando-os como os componentes cuja produção é a mais poluente.

Esses resultados são consistentes com o estudo de Silva et al. (2018), que avaliou a pegada de carbono da fertilização química comercial. O estudo revelou que 62,9% das emissões dos processos de fabricação e transporte até a fazenda experimental foram provenientes da ureia, enquanto o superfosfato simples contribuiu com 16,8% e o cloreto de potássio com 20,3%, considerando aplicações de 100 kg/ha.ano de ureia, 80 kg/ha.ano de superfosfato simples e 80 kg/ha.ano de cloreto de potássio.

Apesar disso, na composição do fertilizante NPK avaliado, os nitrogenados apresentaram menor impacto na pegada de carbono total apenas devido à sua menor proporção em relação aos demais componentes. Essa relação é corroborada pelos dados da Carbonchain (2024), que indicam que, ao considerar as emissões totais, fertilizantes nitrogenados emitem aproximadamente 2,6 toneladas de CO₂-eq por tonelada de produto, enquanto os fertilizantes fosfatados e potássicos emitem 1,7 e 0,6 toneladas de CO₂-eq por tonelada, respectivamente.

É importante destacar que a produção de dolomita foi insignificante, representando apenas 1,2% do total de emissões, o que indica a relevância de considerar apenas os macronutrientes na análise. Contudo, a etapa de transporte da dolomita teve impacto significativo devido às grandes quantidades demandadas, representando 90,63% das emissões relacionadas à sua contribuição na análise.

4.4. Comparações

A Avaliação de Ciclo de Vida realizada, através dos dados do inventário e da avaliação de impacto ambiental, permitiu quantificar os níveis de emissões de gases de efeito estufa associados à produção e transporte de 1 Kg de biofertilizante de *Arthrospira sp.* e de 1 Kg de fertilizante NPK (5-20-20) em unidade dióxido de carbono equivalente.

O processo produtivo e de transporte internacional do NPK confere-lhe uma pegada de carbono mais elevada. Os resultados mostraram que 1 Kg de biofertilizante é responsável pela emissão de 0,49 kg de CO₂-eq, enquanto o fertilizante NPK resultou em 1,31 kg de CO₂-eq. Esse resultado mostra um impacto 2,70 vezes menor do biofertilizante em comparação ao NPK em relação ao potencial de aquecimento global.

Figura 31 – Diagrama de Sankey do sistema de produto da produção e transporte do biofertilizante feito com 100% de biomassa para o campo de cevada.



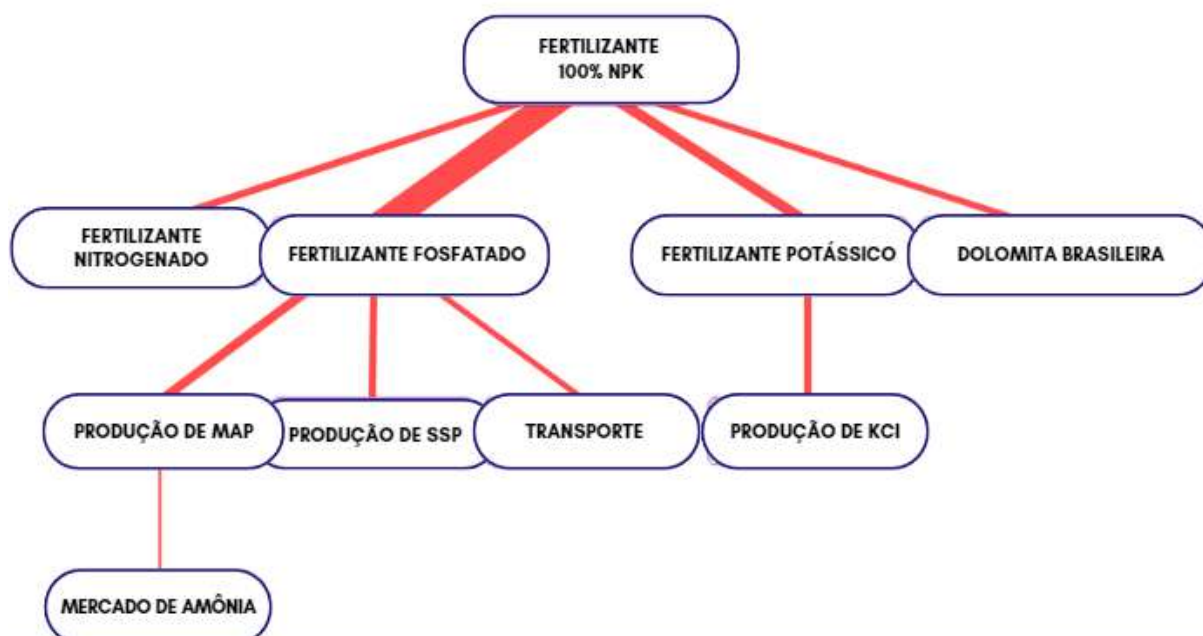
Fonte: elaboração própria.

O biofertilizante, ao utilizar efluentes industriais como meio de cultivo, microalgas que capturam CO₂ e processos otimizados para menor consumo energético, como a filtração por gravidade, apresenta um consumo reduzido de energia, resultando em menores emissões de GEE. Ao analisarmos a contribuição da produção do biofertilizante, ilustrada na Figura 31, a etapa de cultivo das cianobactérias se destaca como uma das mais relevantes. Essa característica se deve ao uso de energia proveniente do grid para movimentação dos *paddle wheels*, o que reforça que, caso fontes de energia renovável sejam utilizadas, as emissões poderiam ser ainda mais reduzidas.

Além disso, a curta distância entre o local de produção e o de aplicação do biofertilizante desempenha um papel relevante na redução das emissões, especialmente em comparação com sistemas que dependem de importação, dado que o transporte é uma das etapas com maior impacto no sistema. Contudo, infere-se que, caso o local de produção e o local de aplicação do biofertilizante sejam ainda mais próximos, os resultados poderiam ser significativamente mais promissores em termos de mitigação de emissões.

Em contraste, Menegat, Ledo e Tirado (2022) demonstram que, ao avaliar as emissões totais dos fertilizantes sintéticos, incluindo aquelas provenientes do uso no solo, o transporte corresponde a apenas 2,6% das emissões associadas, enquanto a fabricação representa 38,8% e o uso no solo contribui com 58,6%.

Figura 32 – Diagrama de Sankey do sistema de produto da produção e transporte de fertilizante 100% NPK para o campo de cevada.



Fonte: elaboração própria.

Ao observar o diagrama de Sankey do fertilizante, ilustrado pela Figura 31, é possível identificar que, para o NPK (5-20-20), as etapas mais intensivas em carbono estão associadas ao fertilizante fosfatado. Esse fato está alinhado com a discussão anterior, que aponta as maiores emissões do fosfatado devido à sua proporção superior em relação às contribuições nitrogenadas. Além disso, o processo de produção dos potássicos apresenta menor complexidade, pois não requer o beneficiamento com matérias-primas intermediárias, como a amônia utilizada nos fosfatados MAP e DAP, conforme ilustrado na Figura 14.

Isso permite inferir que, para o fertilizante NPK, as emissões poderiam ser reduzidas de forma mais eficiente com a diminuição da importação de fertilizantes fosfatados. De acordo com a Outlook GlobalFert 2024, o Brasil importa 58% da sua demanda por esses fertilizantes. No entanto, 42% são produzidos internamente, indicando que considerar apenas fertilizantes importados na análise pode não ter sido representativo, especialmente no que diz respeito ao transporte. Além disso, é necessário avaliar o potencial de aumento da produção nacional de fosfatados de forma mais limpa, já que a rocha fosfática brasileira apresenta menor

concentração de nutrientes em comparação com as reservas internacionais (BALANÇO MINERAL BRASILEIRO, 2001).

4.5 Análise de Sensibilidade

Foi realizada uma análise de sensibilidade para considerar substituições graduais dos fertilizantes, avaliando o impacto sobre as emissões de GEE. Para isso, foi determinado três cenários, com substituição do NPK pelo biofertilizante considerando uma adesão de: 100%, 75% e 50%.

Tabela 4 – Análise de sensibilidade entre a substituição dos fertilizantes.

Fertilizante	Emissões de GEE (CO ₂ -eq/Kg)	Redução de impacto em relação ao fertilizante	Redução de impacto em relação ao fertilizante
		100% NPK	100% NPK
100% NPK	1,31275	-	-
50% Biomassa, 50% NPK	0,89930	1,46x	31,5%
75% Biomassa, 25% NPK	0,69257	1,89x	47,2%
100% Biomassa	0,48584	2,70x	63,0%

Fonte: elaboração própria.

Para o fertilizante composto de 75% da biomassa cultivada e 25% de NPK, estima-se a emissão de 0,69257 Kg de CO₂-eq por Kg de fertilizante. Isso representa um impacto positivo,

com uma redução de emissões de GEE em 1,89 vezes em comparação ao fertilizante 100% NPK.

Já considerando uma adesão parcial do fertilizante em 50% de biomassa e 50% de NPK, é observado que, para 1Kg de fertilizante, há emissão de 0,89930 Kg de CO₂-eq. Isso significa uma redução da pegada de carbono em 1,46 vezes em relação ao fertilizante 100% NPK (5-20-20).

Esses cenários demonstram que, mesmo com substituições parciais, o biofertilizante de biomassa de *Arthrospira* sp. pode resultar em reduções substanciais nas emissões de GEE em relação ao NPK, considerando as etapas produtivas e de transporte. A flexibilidade do uso de biofertilizantes em diferentes proporções permite que produtores adaptem suas práticas agrícolas conforme suas necessidades e capacidades, promovendo, assim, uma transição para uma agricultura mais sustentável.

4.6 Interpretações para refinamento

Durante a fase de interpretação da metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida, são consideradas sugestões para o refinamento do estudo. Um ponto relevante a ser discutido é a escolha da unidade funcional, que permeia toda a análise. Nesse estudo, a unidade foi definida como 1 Kg de fertilizante, seja sintético ou de biomassa, de forma a avaliar a mesma função, uma vez que, no artigo base, os fertilizantes foram substituídos nas mesmas proporções. No entanto, como sugestão para aprimorar futuras avaliações, recomenda-se a caracterização da composição do biofertilizante em termos de N, P e K. Isso possibilitaria analisar diferentes composições de fertilizantes comerciais, já que estes são comercializados em diversas proporções, permitindo comparações mais precisas, baseadas em quantidades individuais de macronutrientes e para diferentes tipos de cultivos.

Adicionalmente, seria interessante investigar a eficiência de uso do biofertilizante em relação aos fertilizantes sintéticos. De acordo com Atzori *et al.* (2020), o biofertilizante Bioguan — uma mistura de macroalgas, spirulina e guano — utilizado em cultivos de cevada, demonstrou alta eficiência na absorção de N (60%) e K (41%), permitindo o uso em menores

quantidades com resultados promissores. Assim, avaliar a quantidade demandada do biofertilizante para fins comparativos pode ser um caminho promissor.

Outro aspecto importante é a análise das emissões associadas ao uso dos fertilizantes no solo. Segundo Carbonchain (2024), essas emissões correspondem a 33,6% do total associado apenas à aplicação direta, excluindo as emissões indiretas. Portanto, recomenda-se uma abordagem "do berço ao túmulo" em estudos de ACV futuros, abrangendo todas as etapas do ciclo de vida do produto.

5 CONCLUSÕES

A análise do processo produtivo e do transporte dos fertilizantes descritos neste estudo revelou que o biofertilizante de *Arthrospira* sp. apresenta um impacto no aquecimento global aproximadamente 2,70 vezes menor que o fertilizante NPK importado para o Brasil, representando uma redução de 63% nas emissões. Esse dado é significativo, pois demonstra o potencial de promover mudanças nas práticas e insumos utilizados na cadeia de valor agrícola, tornando-a menos intensiva em emissões de gases de efeito estufa.

Além disso, foram avaliadas reduções de 31,5% e 47,2% nas emissões para substituições parciais de 50% e 75% do fertilizante convencional, respectivamente, indicando que mudanças graduais também oferecem mitigações significativas.

Adicionalmente, a produção nacional de biofertilizantes, utilizados em cultivos de cevada a partir de efluentes de cervejaria e processos de baixa intensidade energética, contribui para a economia circular no setor cervejeiro. Essa abordagem é considerada sustentável, pois aproveita resíduos da produção de cerveja para gerar fertilizantes biológicos com menor pegada de carbono, contribuindo para a mitigação da crise climática.

O biofertilizante tem potencial de contribuir para o Plano Nacional de Fertilizantes, sendo uma alternativa eficiente e de origem nacional, reforçando sua relevância estratégica para o setor agrícola brasileiro.

5.1. Sugestões para Trabalhos Futuros

O estudo foi capaz de demonstrar o potencial positivo na substituição dos fertilizantes convencionais de processos intensivos em carbono pelo biofertilizante de biomassa de microalga a partir dos processos de produção e transporte, considerando uma análise de ACV de “do berço ao portão”. Porém, uma análise do tipo “do berço ao túmulo” é indicada para avaliar as emissões geradas no uso dos fertilizantes no campo, de forma a obter uma resposta considerando todo o ciclo de vida, desde a extração das matérias-primas até a destinação final.

Nesse sentido, é essencial avaliar os gases de efeito estufa liberados pelo uso dos fertilizantes no solo, como o óxido nitroso gerado pelos fertilizantes nitrogenados, analisando se o biofertilizante também é responsável por emissões similares. Além disso, é indicado avaliar a diferença no potencial de armazenamento de carbono no solo com uso dos diferentes fertilizantes, assim como analisar a eficiência na absorção dos nutrientes nos cultivos. Essa comparação é relevante devido às perdas significativas por lixiviação dos fertilizantes convencionais.

Outra sugestão é incluir a quantidade de fertilizante NPK produzido nacionalmente, principalmente da contribuição dos fosfatados, permitindo uma avaliação mais completa das emissões de GEE associadas. Também seria importante considerar a contribuição energética envolvida na mistura das composições para a formulação do fertilizante misto. Adicionalmente, é relevante analisar as diferentes composições disponíveis no mercado, considerando proporções variadas de N, P e K, a fim de comparar as pegadas de carbono de cada formulação. Para tornar a análise mais precisa e representativa, é fundamental contabilizar todos os componentes do fertilizante misto, incluindo micronutrientes e nutrientes secundários, e não apenas a contribuição da dolomita, como foi o caso.

Além disso, é necessário avaliar os aspectos relacionados à viabilidade econômica e logística de produção do biofertilizante em larga escala, visando a escalabilidade para atender certa demanda de mercado. Portanto, análises considerando aspectos climáticos, geográficos, comportamentais e econômicos são indicadas para avaliar a viabilidade, aceitação e os custos relacionados à produção, transporte e uso.

Portanto, esses estudos são fundamentais para avaliar de forma mais robusta o papel do biofertilizante de *Arthrospira sp.* cultivada em efluente de cervejaria como uma alternativa sustentável, através da promoção de uma agricultura de baixo carbono, circular e capaz de atender certas demandas de mercado.

REFERÊNCIAS

- ABDEL-RAOUF, N.; AL-HOM AidAN, A. A.; IBRAHEEM, I. B. M. **MICROALGAE AND WASTEWATER TREATMENT.** *SAUDI JOURNAL OF BIOLOGICAL SCIENCES*, v. 19, n. 3, p. 257–275, 2012.
- ABREU, A. P.; MARTINS, R.; NUNES, J. **EMERGING APPLICATIONS OF CHLORELLA SP. AND SPIRULINA (ARTHROSPIRA) SP.** *BIOENGINEERING*, v. 10, n. 955, 2023. DISPONÍVEL EM: [HTTPS://DOI.ORG/10.3390/BIOENGINEERING10080955](https://doi.org/10.3390/bioengineering10080955). ACESSO EM: 8 SET. 2024.
- ACV BRASIL. **PEGADA DE CARBONO DE PRODUTO.** DISPONÍVEL EM: [HTTPS://ACVBRASIL.COM.BR/CONSULTORIAS/PEGADA-DE-CARBONO](https://acvbrasil.com.br/consultorias/pegada-de-carbono). ACESSO EM: 10 DEZ. 2024.
- AGUIAR, F. S.; SILVA, R. F. **MODELAGEM DE FLUXOS DE POLUIÇÃO HÍDRICA EM ÁREAS AGRÍCOLAS.** *REVISTA BRASILEIRA DE RECURSOS HÍDRICOS*, v. 12, n. 3, p. 69-80, 2007.
- AHMED, F.; HASAN, S. Z.; JUNAID, A. **POTENTIAL OF MICROALGAE-BASED PRODUCTS FOR SUSTAINABLE AGRICULTURE.** *JOURNAL OF SUSTAINABLE AGRICULTURE*, v. 11, p. 132-146, 2017.
- ALCÂNTARA, CAREM VIEIRA. **ESTUDO MONITORAMENTO E AVALIAÇÃO DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE EFLUENTES INDUSTRIAIS: ESTUDO DE CASO DE INDÚSTRIAS DE POLÍMEROS E CERVEJEIRA.** 2012. 74 F. DISSERTAÇÃO (MESTRADO EM ENGENHARIA QUÍMICA) – UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO, RECIFE, 2012.
- ALGAE BIOFUEL. **WATERWORLD,** 1 MAIO 2012. DISPONÍVEL EM: [HTTPS://WWW.WATERWORLD.COM](https://www.waterworld.com). ACESSO EM: 8 NOV. 2024.
- ALMEIDA, A. **PRODUÇÃO DE FERTILIZANTES ORGANOMINERAL A PARTIR DE RESÍDUOS ORGÂNICOS.** MONOGRAFIA (MONOGRAFIA EM ENGENHARIA QUÍMICA) – UNIVERSIDADE DE UBERABA, UBERABA, MG, 2018.
- AMADO, T. J. C.; MIELNICZUK, J.; FERNANDES, S. B. V. **LEGUMINOSAS E ADUBAÇÃO MINERAL COMO FONTES DE NITROGÊNIO PARA O MILHO EM SISTEMAS DE PREPARO DO SOLO.** *REVISTA BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO*, VIÇOSA, v. 24, n. 4, p. 179-189, 2000.

AMBSCIENCE. **TRATAMENTO DE EFLUENTES: PRINCIPAIS DESAFIOS E SOLUÇÕES.** DISPONÍVEL EM: [HTTPS://AMBSCIENCE.COM/TRATAMENTO-DE-EFLUENTES/](https://ambscience.com/tratamento-de-efluentes/). ACESSO EM: 10 DEZ. 2024.

AMENORFENYO, D. K.; HUANG, X.; ZHANG, Y.; ZENG, Q.; ZHANG, N.; REN, J.; HUANG, Q. **MICROALGAE BREWERY WASTEWATER TREATMENT: POTENTIALS, BENEFITS, AND CHALLENGES.** *INTERNATIONAL JOURNAL OF ENVIRONMENTAL RESEARCH AND PUBLIC HEALTH*, v. 16, n. 11, p. 1910, 2019. DISPONÍVEL EM: [HTTPS://DOI.ORG/10.3390/IJERPH16111910](https://doi.org/10.3390/IJERPH16111910). ACESSO EM: 8 SET. 2024.

ANDA. **ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS.** DISPONÍVEL EM: [HTTP://WWW.ANDA.ORG.BR](http://www.anda.org.br). ACESSO EM: 22 JUL. 2024.

ANGASSA, KENATU ET AL. **BREWERY INDUSTRIAL WASTEWATER TREATMENT THROUGH MESOCOSM HORIZONTAL SUBSURFACE FLOW CONSTRUCTED WETLAND.** *ENVIRONMENT SYSTEMS AND DECISIONS*, v. 42, n. 3, p. 534-548, 2022. DISPONÍVEL EM: [HTTPS://DOI.ORG/10.1007/s10669-022-09849-z](https://doi.org/10.1007/s10669-022-09849-z). ACESSO EM: 10 NOV. 2024.

ARANTES, M. K. **PRODUÇÃO DE BIOHIDROGÊNIO EM REATOR ANAERÓBIO OPERADO EM BATELADAS SEQUENCIAIS COM BIOMASSA IMOBILIZADA (ANSBBR) A PARTIR DE ÁGUA RESIDUÁRIA DE CERVEJARIA.** TESE (DOUTORADO) – UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ, CENTRO DE ENGENHARIAS E CIÊNCIAS EXATAS, PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO “STRICTO SENSU” EM ENGENHARIA QUÍMICA, 2018.

ARAVANTINO, A. F.; THEODORAKOPOULOS, M. A.; MANARIOTIS, I. D. **SELECTION OF MICROALGAE FOR WASTEWATER TREATMENT AND POTENTIAL LIPIDS PRODUCTION.** *BIORESOURCE TECHNOLOGY*, v. 147, p. 130-134, 2013. DISPONÍVEL EM: [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.BIORTECH.2013.08.024](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.08.024).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14040:2009: GESTÃO AMBIENTAL – AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA – PRINCÍPIOS E ESTRUTURA.** RIO DE JANEIRO: ABNT, 2009. 21 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14044:2009: GESTÃO AMBIENTAL – AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA – REQUISITOS E ORIENTAÇÕES.** RIO DE JANEIRO: ABNT, 2009. 46 p.

ATHENA INSTITUTE; NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY. **U.S. LCI DATABASE OVERVIEW AND DATA SUBMISSION REQUIREMENTS: VERSION (DRAFT) 2.** 2010.

ATZORI, G.; NISSIM, W. G.; RODOLFI, L.; NICCOLAI, A.; BIONDI, N.; MANCUSO, S.; TREDICI, M. R. **ALGAE AND BIOGUANO AS PROMISING SOURCES OF ORGANIC FERTILIZERS.**

JOURNAL OF APPLIED PHYCOLOGY, v. 32, p. 3971–3981, 2020. DISPONÍVEL EM: [HTTPS://DOI.ORG/10.1007/s10811-020-02261-7](https://doi.org/10.1007/s10811-020-02261-7). ACESSO EM: 11 DEZ. 2024.

BEHESHTIPOUR, H.; MORTAZAVIAN, A. M.; HARATIAN, P.; HOSRAVIDARANI, K. **EFFECTS OF CHLORELLA VULGARIS AND ARTHROSPIRA PLATENSIS ADDITION ON VIABILITY OF PROBIOTIC BACTERIA IN YOGURT AND ITS BIOCHEMICAL PROPERTIES.** *EUROPEAN FOOD RESEARCH AND TECHNOLOGY*, v. 235, N. 4, p. 719-728, 2012.

BENEDETTI, C. **GESTÃO AMBIENTAL EM INDÚSTRIAS CERVEJEIRAS: PRÁTICAS E ALTERNATIVAS PARA A SUSTENTABILIDADE.** *REVISTA SUSTENTABILIDADE EM FOCO*, v. 15, N. 3, p. 45-58, 2018.

BIGNON, LETÍCIA MORAES PEREIRA. **AValiação da produção de biomassa de microalgas em meios alternativos e sua utilização como bioestimulante vegetal.** Tese (Doutorado em Meio Ambiente) – UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO, RIO DE JANEIRO, 2023.

BORASTE, A. ET AL. **BIOFERTILIZERS: A NOVEL TOOL FOR AGRICULTURE.** *INTERNATIONAL JOURNAL OF MICROBIOLOGY RESEARCH*, v. 1, N. 2, p. 23–31, 2009.

BRENNAN, L.; OWENDE, P. **BIOFUELS FROM MICROALGAE – A REVIEW OF TECHNOLOGIES FOR PRODUCTION, PROCESSING, AND EXTRACTIONS OF BIOFUELS AND CO-PRODUCTS.** *RENEWABLE AND SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS*, v. 14, p. 557–577, 2010.

BREDEMEIER, C.; MUNDSTOCK, C. M. **REGULAÇÃO DA ABSORÇÃO E ASSIMILAÇÃO DO NITROGÊNIO NAS PLANTAS.** *CIÊNCIA RURAL*, SANTA MARIA, v. 30, N. 2, p. 365-372, 2000.

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **ANUÁRIO MINERAL BRASILEIRO: 2010.** BRASÍLIA: DNPM, 2011. DISPONÍVEL EM: [HTTP://WWW.DNPM.GOV.BR](http://www.dnpm.gov.br). ACESSO EM: 18 AGO. 2024.

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **BALANÇO MINERAL BRASILEIRO 2001: FOSFATO.** BRASÍLIA: DNPM, 2001. DISPONÍVEL EM: [HTTP://WWW.DNPM.GOV.BR](http://www.dnpm.gov.br). ACESSO EM: 8 NOV. 2024.

BRASIL. MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES. **INVENTÁRIO NACIONAL POR UNIDADE FEDERATIVA DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA: RESULTADOS DO INVENTÁRIO NACIONAL.** BRASÍLIA: MCTI, 2021. DISPONÍVEL EM: [HTTPS://WWW.GOV.BR/MCTI/SIRENE](https://www.gov.br/mcti/sirene). ACESSO EM: 22 MAIO 2024.

BRASIL. MINISTÉRIO DA INDÚSTRIA, COMÉRCIO EXTERIOR E SERVIÇOS. **PLANO NACIONAL DE FERTILIZANTES 2050: UMA ESTRATÉGIA PARA OS FERTILIZANTES NO BRASIL.** BRASÍLIA: SDIC/MGI, 2023. 197 p. DISPONÍVEL EM: [HTTPS://WWW.GOV.BR](https://www.gov.br). ACESSO EM: 10 NOV. 2024.

BRASIL. SECRETARIA ESPECIAL DE ASSUNTOS ESTRATÉGICOS. **PRODUÇÃO NACIONAL DE FERTILIZANTES: ESTUDO ESTRATÉGICO**. BRASÍLIA: SAE, 2020. DISPONÍVEL EM: [HTTPS://WWW.GOV.BR](https://www.gov.br). ACESSO EM: 10 NOV. 2024.

BURCZYK, J. ET AL. **POLYAMINES IN CELL WALLS OF CHLOROCOCCALEAN MICROALGAE**. *VERLAG DER ZEITSCHRIFT FÜR NATURFORSCHUNG*, v. 69, p. 75–80, 2014. DISPONÍVEL EM: [HTTPS://DOI.ORG/10.5560/ZNC.2012-0215](https://doi.org/10.5560/znc.2012-0215).

CAMACHO, A.; WIT, R. **EFFECT OF NITROGEN AND PHOSPHORUS ADDITIONS ON A BENTHIC MICROBIAL MAT FROM A HYPERSALINE LAKE**. *AQUATIC MICROBIAL ECOLOGY*, v. 32, p. 261-273, 2003.

CARBONCHAIN. **UNDERSTAND YOUR SYNTHETIC FERTILIZER EMISSIONS**. 2024. DISPONÍVEL EM: [HTTPS://WWW.CARBONCHAIN.COM/BLOG/UNDERSTAND-YOUR-SYNTHETIC-FERTILIZER-EMISSIONS#:~:TEXT=AROUND% 202.6% 20TONNES% 20OF% 20CARBON% 2COF% 20POTASSIUM % 2DBASED% 20FERTILIZER% 20PRODUCTION](https://www.carbonchain.com/blog/understand-your-synthetic-fertilizer-emissions#:~:text=Around%202.6%20tonnes%20of%20carbon%20of%20potassium%20based%20fertilizer%20production). ACESSO EM: 10 DEZ. 2024.

CECCHIN, M. ET AL. **MOLECULAR BASIS OF AUTOTROPHIC VS MIXOTROPHIC GROWTH IN CHLORELLA SOROKINIANA**. *SCIENTIFIC REPORTS*, v. 8, n. 1, p. 1-13, 24 ABR. 2018. DISPONÍVEL EM: [HTTPS://DOI.ORG/10.1038/S41598-018-24979-8](https://doi.org/10.1038/s41598-018-24979-8).

ÇELEKLI, A.; YAVUZATMACA, M. **MODELING OF BIOMASS PRODUCTION BY SPIRULINA PLATENSIS AS FUNCTION OF PHOSPHATE CONCENTRATIONS AND PH REGIMES**. *BIORESOURCE TECHNOLOGY*, 2009.

ÇELEKLI, A.; YAVUZATMACA, M. **PREDICTIVE MODELING OF BIOMASS PRODUCTION BY SPIRULINA PLATENSIS AS FUNCTION OF NITRATE AND NaCl CONCENTRATIONS**. *BIORESOURCE TECHNOLOGY*, v. 100, n. 5, p. 1847-1851, 2009.

CHEN, J. PAUL; SENG, SWEE-SONG; HUNG, YUNG-TSE. **SOFT DRINK WASTE TREATMENT**. BOCA RATON: TAYLOR & FRANCIS, 2006.

CHATTERJEE, A. ET AL. **ROLE OF ALGAE AS A BIOFERTILIZER**. IN: **ALGAL GREEN CHEMISTRY: RECENT PROGRESS IN BIOTECHNOLOGY**. BANARAS HINDU UNIVERSITY, 2017. DISPONÍVEL EM: [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/B978-0-444-63784-0.00010-2](https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63784-0.00010-2). ACESSO EM: 22 OUT. 2024.

CHEW, K. W. ET AL. **MICROALGAE BIOREFINERY: HIGH VALUE PRODUCTS PERSPECTIVES**. *BIORESOURCE TECHNOLOGY*, v. 229, p. 53-62, 2017. DISPONÍVEL EM: [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.BIORTECH.2017.01.006](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.01.006).

CHENG, J.; HUANG, Y.; LIU, W.; ZHAO, Y. **OPTIMIZATION OF MICROALGAE GROWTH CONDITIONS FOR BIODIESEL PRODUCTION**. *BIORESOURCE TECHNOLOGY*, v. 218, p. 123-131, 2016. DISPONÍVEL EM: [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.BIORTECH.2016.06.105](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.06.105).

CHOJNACKA, K.; NOWORYTA, A. **EVALUATION OF SPIRULINA SP. GROWTH IN PHOTOAUTOTROPHIC, HETEROTROPHIC AND MIXOTROPHIC CULTURES.** *ENZYME AND MICROBIAL TECHNOLOGY*, v. 34, n. 5, p. 461-465, 2004.

COLTRO, L. **AValiação do Ciclo de Vida – ACV.** IN: _____. **AValiação do Ciclo de Vida como Instrumento de Gestão.** CAMPINAS: CETEA/ITAL, 2007. p. 7-14.

COMISSÃO EUROPEIA. **MANUAL DO SISTEMA ILCD: GUIA GERAL PARA AVALIAÇÕES DE CICLO DE VIDA – ORIENTAÇÕES DETALHADAS.** TRADUÇÃO: LUIZ MARCOS VASCONCELOS; REVISÃO DE TRADUÇÃO: ARMANDO DE CALDEIRA PIRES. BRASÍLIA: CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA (CNI), 2014. 293 p. DISPONÍVEL EM: [HTTPS://ACV.IBICT.BR](https://acv.ibict.br). ACESSO EM: 8 NOV. 2024.

CORTEZ, L. ET AL. **DESENVOLVIMENTO DE BIOENERGIA A PARTIR DE RESÍDUOS AGRÍCOLAS.** *REVISTA BIOENERGIA*, v. 20, n. 2, p. 15-28, 2012.

COSTA, A. C.; OLIVEIRA, J. R.; SANTOS, T. A. **VIABILIDADE DO USO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS TRATADAS NA IRRIGAÇÃO AGRÍCOLA.** *CADERNOS DE ENGENHARIA AGRÍCOLA*, v. 25, n. 1, p. 72-83, 2016.

CROSBY, G. A.; SNYDER, G. H. **UTILIZAÇÃO DE MICROALGAS PARA REMOÇÃO DE NUTRIENTES EM EFLUENTES INDUSTRIAIS.** *JOURNAL OF APPLIED PHYCOLOGY*, v. 15, n. 4, p. 235-247, 2014.

CUNHA, LETÍCIA CAROLINA DA. **ANÁLISE DE EFLUENTE BRUTO E PROPOSTA DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES EM INDÚSTRIA CERVEJEIRA DO VALE DO TAQUARI.** MONOGRAFIA (BACHARELADO EM ENGENHARIA QUÍMICA) – UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI – UNIVATES, LAJEADO, 2019.

DANESHVAR, EHSAN ET AL. **INSIGHTS INTO UPSTREAM PROCESSING OF MICROALGAE: A REVIEW.** *BIORESOURCE TECHNOLOGY*, v. 329, 2021. DISPONÍVEL EM: [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.BIORTECH.2021.124870](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124870).

DE ARAÚJO, E. P.; BARBOSA, F. F. **ESTUDO DE CASOS SOBRE O USO DE FERTILIZANTES ORGÂNICOS NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO.** *REVISTA DE ESTUDOS EM DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL*, v. 13, n. 2, p. 101-115, 2019.

DEMIRBAS, A. **USE OF ALGAE AS BIOFUEL SOURCES.** *ENERGY CONVERSION AND MANAGEMENT*, v. 51, n. 12, p. 2738–2749, 2010.

DIAS, L. M.; FONSECA, J. C. **COMPARAÇÃO DE MÉTODOS DE TRATAMENTO DE EFLUENTES EM PEQUENAS INDÚSTRIAS.** *REVISTA DE ENGENHARIA AMBIENTAL*, v. 28, n. 4, p. 35-46, 2015.

DIAS, VICTOR PINA; FERNANDES, EDUARDO. **FERTILIZANTES: UMA VISÃO GLOBAL SINTÉTICA.** RIO DE JANEIRO: BNDES, 2006. (BNDES SETORIAL, n. 24, p. 97-138, SET. 2006). DISPONÍVEL EM: [HTTP://WWW.BNDES.GOV.BR](http://www.bndes.gov.br). ACESSO EM: 6 NOV. 2024.

DOGARIS, I.; WELCH, M.; MEISER, A.; WALMSLEY, L.; PHILIPPIDIS, G. **A NOVEL HORIZONTAL PHOTOBIOREACTOR FOR HIGH-DENSITY CULTIVATION OF MICROALGAE.** *BIORESOURCE TECHNOLOGY*, v. 198, p. 316–324, 2015.

ECOINVENT. **DATABASE.** DISPONÍVEL EM: [HTTPS://ECOINVENT.ORG/DATABASE/](https://ecoinvent.org/database/). ACESSO EM: 8 NOV. 2024.

EMBRAPA. **NOVO FERTILIZANTE DEVE REDUZIR CUSTOS NO EMPREGO DE UREIA.** PORTAL EMBRAPA, 15 MAIO 2018. DISPONÍVEL EM: [HTTPS://WWW.EMBRAPA.BR/BUSCA-DE-NOTICIAS/-/NOTICIA/34227800/NOVO-FERTILIZANTE-DEVE-REDUZIR-CUSTOS-NO-EMPREGO-DE-UREIA](https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/34227800/novo-fertilizante-deve-reduzir-custos-no-emprego-de-ureia). ACESSO EM: 10 MAIO 2024.

EUROPEAN COMMISSION. **LIFE CYCLE ASSESSMENT & THE EF METHODS.** DISPONÍVEL EM: [HTTPS://GREEN-BUSINESS.EC.EUROPA.EU/ENVIRONMENTAL-FOOTPRINT-METHODS/LIFE-CYCLE-ASSESSMENT-EF-METHODS_EN](https://green-business.ec.europa.eu/environmental-footprint-methods/life-cycle-assessment-ef-methods_en). ACESSO EM: 7 NOV. 2024.

FERREIRA, J. C. ET AL. **PRODUÇÃO DE BIOFERTILIZANTES LÍQUIDOS: UMA ABORDAGEM SUSTENTÁVEL PARA O REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS.** *CADERNOS DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA*, v. 7, n. 3, p. 77-90, 2020.

FILHO, P. H. A.; MARTINS, J. L. **AValiação DA EFICIÊNCIA DE REATORES BIOLÓGICOS EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE EFLUENTES INDUSTRIAIS.** *REVISTA DE GESTÃO AMBIENTAL*, v. 10, n. 1, p. 21-34, 2016.

FLUENT CARGO. **CARGO TRACKING AND SHIPPING ROUTES WORLDWIDE.** DISPONÍVEL EM: [HTTPS://WWW.FLUENTCARGO.COM/](https://www.fluentcargo.com/). ACESSO EM: 10 JUL. 2024.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (FAO). **UTILIZAÇÃO DE MICROALGAS NO TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS: GUIA TÉCNICO.** ROMA: FAO, 2019. DISPONÍVEL EM: [HTTPS://WWW.FAO.ORG/3/CA4149EN/CA4149EN.PDF](https://www.fao.org/3/CA4149EN/CA4149EN.PDF). ACESSO EM: 22 MAIO 2024.

FRANCISCO, M. L.; ALMEIDA, R. G.; SILVA, T. R. **IMPACTOS AMBIENTAIS DO USO INTENSIVO DE FERTILIZANTES QUÍMICOS NA AGRICULTURA MODERNA.** *REVISTA AMBIENTE E SUSTENTABILIDADE*, v. 12, n. 3, p. 44-55, 2018.

GAO, F.; YANG, Z. H.; LI, C.; HU, C.; ZHANG, Y.; XUE, G. **MICROALGAE-BASED NITROGEN RECOVERY FROM WASTEWATER FOR BIOFERTILIZER PRODUCTION.** *BIORESOURCE TECHNOLOGY*, v. 140, p. 60-68, 2013. DISPONÍVEL EM: [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.BIORTECH.2013.04.047](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.04.047).

GARCIA, M. E. ET AL. **USO DE FERTILIZANTES ORGÂNICOS NO MANEJO SUSTENTÁVEL DA AGRICULTURA DE PRECISÃO.** *REVISTA BRASILEIRA DE AGRICULTURA SUSTENTÁVEL*, v. 5, n. 2, p. 12-26, 2020.

GOEDKOOP, M. ET AL. **ReCiPe 2008: A LIFE CYCLE IMPACT ASSESSMENT METHOD WHICH COMPRISES HARMONIZED CATEGORY INDICATORS AT THE MIDPOINT AND THE ENDPOINT LEVEL.** MINISTERIE VAN VOLKSHUISVESTING, 2009. (REPORT, 1).

GREENFIELD, P. ET AL. **ADVANCES IN BIOTECHNOLOGICAL PROCESSES FOR WASTEWATER TREATMENT USING MICROALGAE.** *ENVIRONMENTAL TECHNOLOGY REVIEWS*, V. 6, N. 1, P. 5-15, 2017. DISPONÍVEL EM: [HTTPS://DOI.ORG/10.1080/21622515.2017.1409505](https://doi.org/10.1080/21622515.2017.1409505).

GROBBELAAR, J. U. **ALGAL BIOTECHNOLOGY: REAL OPPORTUNITIES FOR AFRICA.** *SOUTH AFRICAN JOURNAL OF BOTANY*, V. 70, N. 1, P. 140-144, 2004.

GUELFÍ, DOUGLAS. **FERTILIZANTES NITROGENADOS ESTABILIZADOS, DE LIBERAÇÃO LENTA OU CONTROLADA.** PIRACICABA: INTERNATIONAL PLANT NUTRITION INSTITUTE - BRASIL, 2017. 157 P. DISPONÍVEL EM: [HTTP://BRASIL.IPNI.NET](http://brasil.ipni.net). ACESSO EM: 4 NOV. 2024.

GUERREIRO, L. **EFLUENTE EM CERVEJARIA.** RESPOSTA TÉCNICA. REDE DE TECNOLOGIA DO RIO DE JANEIRO, RIO DE JANEIRO, 2006.

HARRISON, G. H.; COLLINS, A. C. **A PERSPECTIVA DO USO DE BIOFERTILIZANTES COMO FERRAMENTA PARA MITIGAÇÃO AMBIENTAL.** *SUSTAINABLE AGRICULTURE*, V. 10, P. 211-224, 2021.

HERNANDEZ, M. E.; LOPEZ, A. S.; RAMOS, R. E. **PRODUÇÃO DE BIOMASSA DE MICROALGAS EM FOTOBIOREATORES DE ALTA EFICIÊNCIA: AVANÇOS RECENTES.** *REVISTA DE BIOTECNOLOGIA APLICADA*, V. 28, N. 1, P. 55-67, 2019.

HU, Q. **INDUSTRIAL PRODUCTION OF MICROALGAL CELL-MASS AND SECONDARY PRODUCTS: MAJOR INDUSTRIAL SPECIES: ARTHROSPIRA (SPIRULINA) PLATENSIS.** IN: RICHMOND, A. (ED.). **HANDBOOK OF MICROALGAL CULTURE: BIOTECHNOLOGY AND APPLIED PHYCOLOGY.** OXFORD: BLACKWELL SCIENCE, 2004. P. 264-272.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **RENEWABLE ENERGY IN INDUSTRY: CURRENT TRENDS AND FUTURE PROSPECTS.** PARIS: IEA, 2020. DISPONÍVEL EM: [HTTPS://WWW.IEA.ORG/REPORTS/RENEWABLE-ENERGY-IN-INDUSTRY](https://www.iea.org/reports/renewable-energy-in-industry). ACESSO EM: 22 MAIO 2024.

INTERNATIONAL FERTILIZER ASSOCIATION (IFA). **FERTILIZER OUTLOOK 2021-2025.** DISPONÍVEL EM: [HTTPS://WWW.FERTILIZER.ORG](https://www.fertilizer.org). ACESSO EM: 22 JUL. 2024.

GAUDÊNCIO, BRUNO ORLANDO ET AL. **AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE DOIS REATORES ANAERÓBIOS DE LEITO FIXO E FLUXO ASCENDENTE ALIMENTADOS COM EFLUENTE DE INDÚSTRIA CERVEJEIRA.** TESE DE DOUTORADO. UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 2013.

IPCC. **CLIMATE CHANGE 2021: SYNTHESIS REPORT. CONTRIBUTION OF WORKING GROUPS I, II AND III TO THE SIXTH ASSESSMENT REPORT OF THE INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE.** 2021.

IPCC. **GUIDELINES FOR NATIONAL GREENHOUSE GAS INVENTORIES**. 2006. DISPONÍVEL EM: [HTTPS://WWW.IPCC-NGGIP.IGES.OR.JP/PUBLIC/2006GL/INDEX.HTML](https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html). ACESSO EM: 22 MAIO 2024.

JIE, M. ET AL. **PREPARATION AND OPTIMIZATION OF AMINO ACID CHELATED MICRONUTRIENT FERTILIZER BY HYDROLYZATION OF CHICKEN WASTE FEATHERS AND THE EFFECTS ON GROWTH OF RICE**. *JOURNAL OF PLANT NUTRITION*, v. 31, p. 571-582, 2008. DISPONÍVEL EM: [HTTPS://DOI.ORG/10.1080/01904160801895092](https://doi.org/10.1080/01904160801895092).

JOINT RESEARCH CENTRE – JRC. **ANALYSIS OF EXISTING ENVIRONMENTAL IMPACT ASSESSMENT METHODOLOGIES FOR USE IN LIFE CYCLE ASSESSMENT: BACKGROUND DOCUMENT**. (ILCD HANDBOOK). 2010.

KANAGACHANDRAN, K.; JAYARATNE, R. **UTILIZATION POTENTIAL OF BREWERY WASTE WATER SLUDGE AS AN ORGANIC FERTILIZER**. *JOURNAL OF THE INSTITUTE OF BREWING*, v. 112, n. 2, 2006.

KIRK, E. A.; BEHRENS, P. W. **COMMERCIAL DEVELOPMENTS IN MICROALGAL BIOTECHNOLOGY**. *JOURNAL OF PHYCOLOGY*, v. 35, p. 215-216, 1999.

KUNJAPUR, A. M.; ELDRIDGE, R. B. **PHOTOBIOREACTOR DESIGN FOR COMMERCIAL BIOFUEL PRODUCTION FROM MICROALGAE**. *INDUSTRIAL & ENGINEERING CHEMISTRY RESEARCH*, v. 49, n. 8, p. 3516–3526, 2010.

KULAIF, YARA. **PERFIL DOS FERTILIZANTES N-P-K**. SECRETARIA DE GEOLOGIA, MINERAÇÃO E TRANSFORMAÇÃO MINERAL-SGM; MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – MME; RELATÓRIO TÉCNICO 75, AGOSTO DE 2009.

LALIBERTÉ, G.; OLGUÍN, E. J.; DE LA NOUE, J. **MASS CULTIVATION AND WASTEWATER TREATMENT USING SPIRULINA**. IN: VONSHAK, A. *SPIRULINA PLATENSIS (ARTHROSPIRA): PHYSIOLOGY, CELL-BIOLOGY AND BIOTECHNOLOGY*. LONDON: TAYLOR & FRANCIS, 1997. P. 159-173.

LIMA, L. H. ET AL. **BIOREMEDIATION OF BREWERY WASTEWATER USING ARTHROSPIRA SP.: PRELIMINARY ASSESSMENT OF BIOMASS AS A BIOFERTILIZER TOWARD CIRCULAR ECONOMY**. *JOURNAL OF APPLIED PHYCOLOGY*, 2024. DISPONÍVEL EM: [HTTPS://DOI.ORG/10.1007/S10811-024-03263-5](https://doi.org/10.1007/s10811-024-03263-5). ACESSO EM: 22 MAIO 2024.

LIVRAMENTO, CARLA G. **AVALIAÇÃO DO USO DE BIOFERTILIZANTES NA PRODUÇÃO AGRÍCOLA SUSTENTÁVEL**. DISSERTAÇÃO (MESTRADO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS) – UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, FLORIANÓPOLIS, 2015.

LOPES, ALEXANDRE COLZI; VALENTE, ANTONIO; IRIBARREN, DIEGO; GONZÁLEZ-FERNÁNDEZ, CRISTINA. **ENERGY BALANCE AND LIFE CYCLE ASSESSMENT OF A MICROALGAE-BASED WASTEWATER TREATMENT PLANT: A FOCUS ON ALTERNATIVE BIOGAS**

USES. *BIORESOURCE TECHNOLOGY*, v. 270, p. 138-146, 2018. DISPONÍVEL EM: [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.BIORTECH.2018.09.005](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.09.005). ACESSO EM: 10 NOV. 2024.

MASSÉ, D.I.; TALBOT, G.; GAGNON, N. **THE EFFECT OF PH ON THE SEPARATION OF SWINE MANURE SOLIDS AND LIQUIDS**. *BIORESOURCE TECHNOLOGY*, v. 77, n. 1, p. 43–49, 2001.

MENEGAT, STEFANO; LEDO, ALICIA; TIRADO, REYES. **GREENHOUSE GAS EMISSIONS FROM GLOBAL PRODUCTION AND USE OF NITROGEN SYNTHETIC FERTILISERS IN AGRICULTURE**. *SCIENTIFIC REPORTS*, v. 12, n. 14490, 2022. DISPONÍVEL EM: [HTTPS://DOI.ORG/10.1038/S41598-022-18773-W](https://doi.org/10.1038/s41598-022-18773-w). ACESSO EM: 10 DEZ. 2024.

MENDES, NATALIA CRESPO; BUENO, CRISTIANE; OMETTO, ALDO ROBERTO. **AValiação DE IMPACTO DO CICLO DE VIDA: REVISÃO DOS PRINCIPAIS MÉTODOS**. *PRODUCTION*, v. 26, n. 1, p. 160-175, JAN./MAR. 2016. DISPONÍVEL EM: [HTTPS://DOI.ORG/10.1590/0103-6513.153213](https://doi.org/10.1590/0103-6513.153213). ACESSO EM: 22 MAIO 2024.

MESSIAS, ARMINDA SACONI ET AL. **FERTILIZANTES**. IN: COMISSÃO ESTADUAL DE FERTILIDADE DO SOLO (RECIFE, PE). **RECOMENDAÇÕES DE ADUBAÇÃO PARA O ESTADO DE PERNAMBUCO: 1ª APROXIMAÇÃO**. RECIFE: COMISSÃO ESTADUAL DE FERTILIDADE DO SOLO, 2008. p. 89-103.

NASCIMENTO, RODRIGO CARVALHO DO. **CULTIVO DE MICROALGAS EM FOTOBIOREATORES DE PLACAS PLANAS PARA A PRODUÇÃO DE BIOMASSA E BIORREMEDIAÇÃO DE EFLUENTE DA AGROINDÚSTRIA DE ÓLEO DE PALMA**. DISSERTAÇÃO (MESTRADO EM BIOTECNOLOGIA) – UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS, GURUPI, 2016.

OLAJIRE, ABASS A. **THE BREWING INDUSTRY AND ENVIRONMENTAL CHALLENGES**. *JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION*, v. 256, p. 102817, 2020. DISPONÍVEL EM: [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.JCLEPRO.2012.03.003](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.03.003). ACESSO EM: 10 NOV. 2024.

PORTES, A. C. **PRÉ-TRATAMENTO DE EFLUENTE DE MICROERVEJARIA POR ADSORÇÃO EMPREGANDO ADSORVENTES ALTERNATIVOS**. DISSERTAÇÃO (MESTRADO) – UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ, SETOR DE MEIO AMBIENTE, PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL, 2016.

REETZ, HAROLD F. JR. **FERTILIZANTES E SEU USO EFICIENTE**. TRADUÇÃO: ALFREDO SCHEID LOPES. PARIS: INTERNATIONAL FERTILIZER INDUSTRY ASSOCIATION (IFA); SÃO PAULO: ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS (ANDA), 2017. DISPONÍVEL EM: [HTTP://WWW.ANDA.ORG.BR](http://www.anda.org.br). ACESSO EM: 10 NOV. 2024.

RIBEIRO, C. B.; SANTOS, E. V.; ALVES, A. F. **GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS E AGROINDUSTRIAIS: ESTUDO DE CASO EM INDÚSTRIAS DO OESTE PAULISTA**. *GESTÃO AMBIENTAL*, v. 20, p. 101–114, 2015.

RIEGER, M.; SPECHT, E.; BECKER, W. **INFLUENCE OF GROWTH MEDIA AND pH VALUE ON THE ACCUMULATION OF FATTY ACIDS IN MICROALGAE.** *EUROPEAN JOURNAL OF PHYCOLOGY*, v. 44, N. 2, P. 201–213, 2009.

RODRIGUES, E. R. **APLICAÇÃO INTEGRADA DE ACV E MCDA PARA A TOMADA DE DECISÃO DO SISTEMA DE TRATAMENTO DO RESÍDUO SÓLIDO ORGÂNICO DOS RESTAURANTES UNIVERSITÁRIOS DA UNICAMP.** 2017. DISSERTAÇÃO (MESTRADO EM ENGENHARIA) – UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS, CAMPINAS, 2017.

RODRIGUES, M. ET AL. **GESTÃO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS NA AGRICULTURA: UTILIZAÇÃO DE BIOFERTILIZANTES COMO ALTERNATIVA SUSTENTÁVEL.** *CADERNOS DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS*, v. 8, N. 2, P. 87-101, 2016.

SAADE, M. R.; SILVA, M. G.; GOMES, V. A. **A AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA – ACV E A ETAPA DE AVALIAÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS: CONSIDERAÇÕES SOBRE O USO DE DIFERENTES MÉTODOS E SEUS REFLEXOS NOS RESULTADOS FINAIS.** *NATUREZA ON LINE*, v. 12, P. 109–116, 2014.

SILVA, GIL ANDER; KULAY, LUIZ ALEXANDRE. **DESEMPENHO AMBIENTAL DE PRODUTOS.** 2010. (PALESTRA EM POWERPOINT).

SILVA, VICTOR ALEXSANDER OLIVEIRA. **APLICAÇÃO DE AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA NA ESTIMATIVA DAS EMISSÕES DE GASES DE EFETO ESTUFA RELACIONADAS AO CONSUMO DE ALIMENTOS: ESTUDO DE CASO EM BRASÍLIA, DF.** 2021. DISSERTAÇÃO (MESTRADO EM TECNOLOGIA AMBIENTAL E RECURSOS HÍDRICOS) – FACULDADE DE TECNOLOGIA, UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, BRASÍLIA, 2021.

SILVA, WALLYSSON KLEBSON DE MEDEIROS; SILVA, CLEITON DE SOUZA; CARVALHO, MONICA; ABRAHÃO, RAPHAEL. **PEGADA DE CARBONO DA FERTILIZAÇÃO NO CULTIVO DA CANA-DE-AÇÚCAR UTILIZANDO BIODSÓLIDO E FERTILIZANTE COMERCIAL.** IN: CONGRESSO BRASILEIRO SOBRE GESTÃO DO CICLO DE VIDA, 6., 2018, BRASÍLIA. ANAIS. BRASÍLIA: IBICT, 2018. P. 240.

TERA AMBIENTAL. **COMO FUNCIONA O TRATAMENTO DE EFLUENTES INDUSTRIAIS.** DISPONÍVEL EM: [HTTPS://WWW.TERAAMBIENTAL.COM.BR/BLOG-DA-TERA-](https://www.teraambiental.com.br/blog-da-tera-)

AMBIENTAL/BID/338190/COMO-FUNCIONA-O-TRATAMENTO-DE-EFLUENTES-INDUSTRIAIS.

ACESSO EM: 10 DEZ. 2024.

UNEP. **GLOBAL GUIDANCE PRINCIPLES FOR LIFE CYCLE ASSESSMENT DATABASES**. [S.L.: S.N.], 2011. DISPONÍVEL EM: [HTTPS://WWW.LIFECYCLEINITIATIVE.ORG/WP-CONTENT/UPLOADS/2012/12/2011%20-%20GLOBAL%20GUIDANCE%20PRINCIPLES.PDF](https://www.lifecycleinitiative.org/wp-content/uploads/2012/12/2011%20-%20GLOBAL%20GUIDANCE%20PRINCIPLES.PDF).

ACESSO EM: 22 OUT. 2024.

UNEP; SETAC. **LIFE CYCLE MANAGEMENT: A BUSINESS GUIDE TO SUSTAINABILITY**. PARIS: UNEP, 2007. 51 p.

WERKNEH, ADHENA AYALIEW; BEYENE, HAYELOM DARGO; OSUNKUNLE, ABDULJELEEL A. **RECENT ADVANCES IN BREWERY WASTEWATER TREATMENT: APPROACHES FOR WATER REUSE AND ENERGY RECOVERY**. *ENVIRONMENTAL SUSTAINABILITY*, v. 2, p. 199–209, 2019. DISPONÍVEL EM: [HTTPS://DOI.ORG/10.1007/s42398-019-00056-2](https://doi.org/10.1007/s42398-019-00056-2). ACESSO EM: 10 NOV. 2024.

WIKIPEDIA. **REGIÃO GEOGRÁFICA INTERMEDIÁRIA DE PASSO FUNDO**. DISPONÍVEL EM: [HTTPS://PT.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/REGI%C3%A3o_GEAGR%C3%A1FICA_INTERMEDI%C3%A1RIA_DE_PASSO_FUNDO](https://pt.wikipedia.org/wiki/Regi%C3%A3o_Geogr%C3%A1fica_Intermedi%C3%A1ria_de_Passo_Fundo). ACESSO EM: 10 NOV. 2024.

WOOD, SAM; COWIE, ANNETTE LOUISE. **A REVIEW OF GREENHOUSE GAS EMISSION FACTORS FOR FERTILISER PRODUCTION**. RESEARCH AND DEVELOPMENT DIVISION, STATE FORESTS OF NEW SOUTH WALES. COOPERATIVE RESEARCH CENTRE FOR GREENHOUSE ACCOUNTING. JUNE 2004. ACESSO EM: 10 DEZ. 2024.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT; WORLD RESOURCES INSTITUTE. **THE GHG PROTOCOL PRODUCT LIFE CYCLE ACCOUNTING AND REPORTING STANDARD**. GENEVA; WASHINGTON, DC: WBCSD; WRI, 2010.

WUFT. **NITROGEN FERTILIZER RELEASES GREENHOUSE GASES THROUGHOUT ITS LIFE CYCLE**. DISPONÍVEL EM: [HTTPS://PROJECTS.WUFT.ORG/PRICEOFPLENTY/NITROGEN-FERTILIZER-RELEASES-GREENHOUSE-GASES-THROUGHOUT-ITS-LIFE-CYCLE/](https://projects.wuft.org/priceofplenty/nitrogen-fertilizer-releases-greenhouse-gases-throughout-its-life-cycle/). ACESSO EM: 10 DEZ. 2024.

YARA BRASIL. **UREIA AGRÍCOLA X NITRATO DE AMÔNIO: QUAL É MELHOR?** DISPONÍVEL EM: [HTTPS://WWW.YARABRASIL.COM.BR/CONTEUDO-AGRONOMICO/BLOG/UREIA-AGRICOLA-X-NITRATO-DE-AMONIO/](https://www.yarabrasil.com.br/conteudo-agronomico/blog/ureia-agricola-x-nitrato-de-amonio/). ACESSO EM: 22 MAIO 2024.

ZHU, L. D.; HAGER, T.; KAZLAUSKAITE, S.; SKJELHAUG, L. M. **MICROALGAE PRODUCTION AS A BIOFERTILIZER FOR AGRICULTURE: A CRITICAL REVIEW.** *SUSTAINABLE ENERGY TECHNOLOGIES AND ASSESSMENTS*, v. 40, 2020. DISPONÍVEL EM: [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.SETA.2020.100733](https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100733).

Paula André da Silva

Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) de Biofertilizante Produzido a partir de *Arthrospira sp.*
Cultivada em Efluente de Cervejaria

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola de Química da Universidade Federal do
Rio de Janeiro, como parte dos requisitos
necessários à obtenção do grau de Engenheira de
Bioprocessos.

Aprovado em 19 de dezembro de 2024.

Documento assinado digitalmente
gov.br ANITA FERREIRA DO VALLE
Data: 28/12/2024 09:34:35-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Anita Ferreira do Valle, Doutora em Ciências, Instituto de Química - UFRJ

Documento assinado digitalmente
gov.br BETTINA SUSANNE HOFFMANN
Data: 23/12/2024 11:26:01-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Bettina Susanne Hoffmann, Doutora em Planejamento Energético, Escola de Química - UFRJ

Documento assinado digitalmente
gov.br JENNY SAYAKA KOMATSU
Data: 23/12/2024 17:59:58-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Jenny Sayaka Komatsu, Doutora em Ciência e Tecnologia Química, Seijun Inovação e
Sustentabilidade Ltda

Documento assinado digitalmente
gov.br DANIELLE MARIA PERPETUA DE OLIVEIRA SANTI
Data: 21/12/2024 16:27:22-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Danielle Maria Perpétua de Oliveira Santos, Doutora em Ciências, Instituto de Química -
UFRJ

Documento assinado digitalmente
gov.br JOSE ANGEL RAMON HERNANDEZ
Data: 20/12/2024 17:25:42-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Jose Angel Ramon Hernandez, Doutor em Ciências Químicas, Escola de Química - UFRJ

Marcelo Mendes Viana, Doutorado em Engenharia Química, Escola de Química – UFRJ
Rio de Janeiro

2024