

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL AMBIENTAL DAS MICROALGAS PARA O
SEQUESTRO E ESTOCAGEM DE CARBONO E PRODUÇÃO DE
BIOFERTILIZANTE**

Luna Lilás Henriques Ildefonso
Magister Scientiae

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2024**

LUNA LILÁS HENRIQUES ILDEFONSO

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL AMBIENTAL DAS MICROALGAS PARA O
SEQUESTRO E ESTOCAGEM DE CARBONO E PRODUÇÃO DE
BIOFERTILIZANTE**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientadora: Natalia Dos Santos Renato

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2024**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

I27a
2024
Ildefonso, Luna Lilás Henriques, 1995-
Avaliação do potencial ambiental das microalgas para o
sequestro e estocagem de carbono e produção de biofertilizante /
Luna Lilás Henriques Ildefonso. – Viçosa, MG, 2024.
1 dissertação eletrônica (76 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Natália dos Santos Renato.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Engenharia Agrícola, 2024.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2024.797>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Biofertilizantes. 2. Microalgas. 3. Microalgas - Ciclos de
vida. 4. Carbono. I. Renato, Natália dos Santos, 1984-.
II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia
Agrícola. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola.
III. Título.

CDD 22. ed. 631.86

LUNA LILÁS HENRIQUES ILDEFONSO

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL AMBIENTAL DAS MICROALGAS PARA O
SEQUESTRO E ESTOCAGEM DE CARBONO E PRODUÇÃO DE
BIOFERTILIZANTE**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 30 de agosto de 2024.

Assentimento:

Luna Lilás Henriques Ildefonso
Autora

Natalia Dos Santos Renato
Orientadora

Essa dissertação foi assinada digitalmente pela autora em 29/11/2024 às 10:17:44 e pela orientadora em 29/11/2024 às 11:09:54. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **IMNO.NVCE.K7SL** e clique no botão 'Validar documento'.

Aos meus pais Elaine e Jefferson,
Aos meus irmãos Ícaro e Tiago,
A toda minha família, amigos e ao meu amor,
pelo incentivo, confiança, apoio e carinho,
DEDICO.

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, gostaria de agradecer à força superior que nos guia e nos dá coragem para enfrentar os desafios diários, por tudo até aqui.

Aos meus pais, Elaine e Jefferson, meus maiores exemplos de perseverança e dedicação, por todos os ensinamentos, amor e apoio ao longo dessa jornada.

Aos meus irmãos Ícaro e Tiago, por toda força, carinho e companheirismo.

Ao meu amor por todo o companheirismo e incentivo.

Agradeço à professora Natalia dos Santos Renato pela orientação constante e pela confiança depositada durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu co-orientador Márcio Arêdes Martins pela atenção e pelos valiosos ensinamentos.

Aos servidores do Laboratório de Biocombustíveis por todo suporte e assistência ao longo da execução do projeto. Em especial, ao Dr. Dilson Novais Rocha, cuja contribuição foi essencial para o sucesso dessa pesquisa.

Ao grupo de pesquisa da área de Energia na Agricultura e aos meus colegas do Laboratório de Biocombustíveis pela ajuda e pela sempre agradável companhia.

À Universidade Federal de Viçosa, e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola pela oportunidade de realizar o mestrado com excelência.

Aos amigos da graduação e da vida, sou grata pelo companheirismo e amor de sempre. Em especial, a Débora, Adrinny, Carine, Werônica, Tacla e Fernanda.

Aos meus familiares, que de alguma forma contribuíram para minha pós-graduação e me ajudaram a alcançar esta conquista, um agradecimento especial ao meu avô Henrique e ao meu tio Edil (in memoriam), que, embora não estejam mais aqui, permanecem vivos em meu coração e fazem parte desta vitória.

À Petróleo Brasileiro S/A (Petrobras) pelo financiamento de parte da pesquisa.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

“O meio ambiente é muito importante em aspectos de paz,
porque quando destruimos nossos recursos, e nossos
recursos tornam-se escassos, nós lutamos por eles”
(Wangari Maathai)

RESUMO

ILDEFONSO, Luna Lilás Henriques, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, agosto de 2024. **AVALIAÇÃO DO POTENCIAL AMBIENTAL DAS MICROALGAS PARA O SEQUESTRO E ESTOCAGEM DE CARBONO E PRODUÇÃO DE BIOFERTILIZANTE.** Orientadora: Natalia Dos Santos Renato.

A crescente demanda por soluções sustentáveis é impulsionada pelo aumento das emissões de GEE, que continuam a crescer apesar de esforços globais. O cultivo de microalgas, como *Scenedesmus obliquus*, se destaca como uma alternativa promissora para o sequestro de carbono e a produção de biofertilizantes, apesar dos desafios, como o alto consumo de energia. Este estudo avaliou o potencial da microalga *Scenedesmus obliquus* BR003 no sequestro de carbono e na produção de biofertilizante, analisando seus impactos ambientais por meio da ACV. A *S. obliquus* foi cultivada com injeção semanal de 595g de CO₂, resultando em um biofertilizante com 50% de carbono orgânico e nutrientes essenciais, como N, P e K. Um experimento com milho foi realizado, envolvendo seis tratamentos e cinco repetições, onde apenas os tratamentos T2 (biofertilizante com P e K inorgânicos) e T4 (NPK inorgânico) foram eficazes no desenvolvimento da cultura, fornecendo nutrientes adequados e proporcionando maior massa seca, com de cerca de 90% de carbono orgânico em T2. A microalga demonstrou uma fixação aparente de 75% do CO₂ injetado, e a aplicação de 5,84 g do biofertilizante no solo resultou na imobilização de 7,42 g de carbono, elevando os níveis de carbono no solo para além do quantitativo oferecido de 417,1 mg de C/L e do teor inicial do solo. Por meio da ACV, realizada no openLCA, foi identificada a eletricidade como a principal fonte de impacto ambiental na produção do biofertilizante. Os resultados mostraram que o tratamento T2 teve menores impactos ambientais em comparação ao T4, indicando que o biofertilizante de microalgas é uma alternativa sustentável, como uma fonte de nitrogênio orgânica.

Palavras-chave: microalgas; carbono; acv

ABSTRACT

ILDEFONSO, Luna Lilás Henriques, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, August, 2024. **ASSESSING THE ENVIRONMENTAL POTENTIAL OF MICROALGAE FOR CARBON CAPTURE AND STORAGE AND BIOFERTILIZER PRODUCTION.** Adviser: Natalia Dos Santos Renato.

The growing demand for sustainable solutions is driven by rising GHG emissions, which continue to increase despite global efforts. The cultivation of microalgae, such as *Scenedesmus obliquus*, stands out as a promising alternative for carbon sequestration and biofertilizer production, despite challenges like high energy consumption. This study evaluated the potential of the microalga *Scenedesmus obliquus* BR003 for carbon sequestration and biofertilizer production, analyzing its environmental impacts through LCA. *S. obliquus* was cultivated with a weekly injection of 595g of CO₂, producing a biofertilizer with 50% organic carbon and essential nutrients like N, P, and K. A maize experiment was conducted involving six treatments and five repetitions, where only treatments T2 (biofertilizer with inorganic P and K) and T4 (inorganic NPK) were effective in crop development, providing adequate nutrients and resulting in higher dry mass, with approximately 90% organic carbon in T2. The microalga demonstrated an apparent fixation of 75% of the injected CO₂, and the application of 5.84 g of biofertilizer to the soil resulted in the immobilization of 7.42 g of carbon, increasing soil carbon levels beyond the provided amount of 417.1 mg C/L and the initial soil content. Through the LCA conducted using openLCA, electricity was identified as the main source of environmental impact in biofertilizer production. The results showed that treatment T2 had lower environmental impacts compared to T4, indicating that microalgae-based biofertilizer is a sustainable alternative as an organic nitrogen source.

Keywords: microalgae; carbon; lca

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Tanque <i>mixing board</i> com sistema propelido por energia solar fotovoltaica.	22
Figura 2 – Produção e injeção de CO ₂ : (A) queima no incinerador, (B) armazenamento em cilindros e (C) injeção no cultivo.....	24
Figura 3 – Fluxograma das etapas da coleta da biomassa de microalgas.....	25
Figura 4 – Processo de secagem da biomassa. (A) Secador, (B) interior do secador, posicionamento da bandeja com a biomassa úmida, (C) biomassa após secagem.	26
Figura 5 – Aplicação e incorporação no solo. (A) Todos os tratamentos pós plantio, (B) aplicação do tratamento 3, (C) incorporação no solo, (D) aplicação tratamento 4, (E) aplicação tratamento 2.	29
Figura 6 – Crescimento da microalga <i>S. obliquus</i> cultivada em tanque tipo <i>mixing board</i>	33
Figura 7 – Estágios de crescimento da cultura do milho.	39
Figura 8 – Massa seca média.	41
Figura 9 – Resultados do carbono orgânico no solo.	43
Figura 10 – Alocação do carbono ao longo do processo de produção e aplicação de 1 kg de biofertilizante.	45
Figura 11 – Limites e diagrama de fluxo do sistema do estudo.....	58
Figura 12 – Limites do sistema para os tratamentos T2 e T4.....	60
Figura 13 – Contribuição de Impactos.....	65
Figura 14 – Comparação percentual dos impactos dos tratamentos T2 (Microalgas com suplementação de P e K inorgânicos) e T4 (Controle Positivo com NPK inorgânico).....	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Caracterização química do solo.	27
Tabela 2 – Delineamento experimental.	28
Tabela 3 – Caracterização bioquímica da biomassa de cada cultivo. Médias seguidas do desvio padrão.	34
Tabela 4 – Caracterização bioquímica do biofertilizante. Médias seguidas do desvio padrão.	35
Tabela 5 – Nutrientes adicionados no solo na forma de microalga seca (biofertilizante) (T1), microalga + fertilizantes (T2), microalga + cinzas (T3), fertilizantes (T4), cinzas (T5) e o controle negativo (T6).....	37
Tabela 6 – Teores de carbono presentes na massa seca de cada tratamento. Médias seguidas do desvio padrão.....	42
Tabela 7 – Inventário do ciclo de vida da produção do biofertilizante.	61
Tabela 8 – Resultados da Avaliação do ciclo de vida da produção do Biofertilizante	64

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AICV	Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida
B	Boro
Ca	Cálcio
CO ₂	Dióxido de carbono
CTC	Capacidade de Troca Catiônica
Cu	Cobre
Fe	Ferro
FeSO ₄	Sulfato de ferro (II)
GEE	Gases de Efeito Estufa
H ₂ O	Água
IC	Carbono inorgânico
ICV	Inventário de Ciclo de Vida
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
ISO	Organização Internacional de Padronização
K	Potássio
KCl	Cloreto de Potássio
MAP	Fosfato Monoamônico
Mg	Magnésio
MgSO ₄	Sulfato de Magnésio
Mn	Manganês
N	Nitrogênio
N ₂	Gás nitrogênio
Na	Sódio
NaOH	Hidróxido de Sódio
NPK	Nitrogênio (N), Fósforo (P) e Potássio (K)
NTK	Nitrogênio total Kjeldahl
O ₂	Gás Oxigênio
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
P	Fósforo
pH	Potencial hidrogeniônico

S	Enxofre
SS	Superfosfato Simples
TC	Carbono total
TOC	Carbono orgânico total
TFSA	Terra fina seca ao ar
TSP	Superfosfato Triplo
Zn	Zinco

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	14
REFERÊNCIAS	16
2. OBJETIVO	18
2.1. Objetivos Específicos	18
CAPÍTULO I: Produção e Avaliação de Biofertilizantes de Microalgas, com ênfase na pegada de carbono	19
1. INTRODUÇÃO	20
2. MATERIAIS E MÉTODOS	22
2.1. Cultivo das Microalgas	22
2.2. Produção e Injeção do Dióxido Carbônico (CO ₂)	23
2.3. Coleta da Biomassa	24
2.4. Secagem da Biomassa	25
2.5. Obtenção do Biofertilizante de microalgas	26
2.6. Caracterização do Biofertilizante.....	26
2.7. Coleta, caracterização e preparo do Solo	27
2.8. Delineamento experimental e aplicação do biofertilizante no solo	28
2.9. Análises das plantas e solo final	30
2.10. Alocação de Carbono	30
2.11. Análise estatística	32
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
3.1. Crescimento e monitoramento do cultivo	33
3.2. Caracterização da Biomassa	34
3.3. Avaliação do biofertilizante no cultivo do milho	36
3.3.1. Cultivo do milho	38
3.4. Massa seca e carbono	41
3.4.1. Carbono na massa seca	42
3.5. Carbono no solo	43
3.6. Alocação do carbono.....	45
4. CONCLUSÕES	47
REFERÊNCIAS	48
CAPÍTULO II: Avaliação do ciclo de vida (ACV) do Biofertilizante de Microalgas e comparação de cenários de sua aplicação no solo	54
1. INTRODUÇÃO	55
2. MATERIAL E MÉTODOS	57
2.1. Avaliação de Ciclo de vida	57

2.2.	Definição do objetivo, unidade funcional e escopo da avaliação do ciclo de vida	57
2.3.	Elaboração do inventário do ciclo de vida dos sistemas de produtos	58
2.4.	Realização da avaliação de impactos de ciclo de vida	59
2.5.	Comparação de cenários	59
3.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
3.1.	Inventário do ciclo de vida produção do Biofertilizante	61
3.2.	Impactos ambientais da produção do Biofertilizante	63
3.2.1.	Consumo e Depleção de água	66
3.2.2.	Aquecimento Global	67
3.2.3.	Eutrofização de água doce, ecotoxicidade terrestre e acidificação terrestre	67
3.2.4.	Escassez de Recursos fósseis	68
3.2.5.	Formação de material particulado e destruição da camada de ozônio	69
3.3.	Comparação entre os Tratamentos	69
4.	CONCLUSÕES	73
	REFERÊNCIAS	74

1. INTRODUÇÃO GERAL

A demanda global por alternativas sustentáveis e ecologicamente corretas tem aumentado em diversos setores da indústria devido às preocupações ambientais decorrentes do explosivo crescimento populacional, que tem intensificado as atividades antropogênicas. Essas atividades, como urbanização, desmatamento e a dependência contínua de combustíveis fósseis para energia, elevam as emissões de gases de efeito estufa, principalmente do dióxido de carbono (CO₂) (MAGHZIAN *et al.*, 2023; MOHAPATRA *et al.*, 2022).

O relatório *Global Carbon Budget 2022* revela que as emissões globais de CO₂ em 2022 aumentaram mais de 1% em comparação a 2021, ano em que as emissões já haviam retornado aos níveis pré-pandêmicos, apresentando um crescimento de 5,1% em relação a 2020 (FRIEDLINGSTEIN *et al.*, 2022). Além disso, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) aponta que é muito provável que as temperaturas globais aumentem em 1,5°C no curto prazo (2021-2040) sob um cenário de altas emissões de gases de efeito estufa (GEE) (IPCC, 2023). Essas tendências vão em sentido contrário as projeções de redução de emissões necessárias para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) até 2030 (MAGHZIAN *et al.*, 2023). Para alterar essa realidade, acordos internacionais, como o Protocolo de Kyoto e o Acordo de Paris, estabeleceram metas de redução de emissões poluentes, incentivando o uso de combustíveis renováveis e o sequestro de carbono (MOHAPATRA *et al.*, 2022).

Nesse contexto, adotar sistemas de captura de carbono em instalações industriais e agrícolas tornou-se indispensável, inclusive em usinas produtoras de biocombustíveis, que ainda emitem CO₂. Atualmente, existem diversas tecnologias de sequestro de carbono pós-combustão, como adsorção, absorção, separação por membrana e o cultivo de microalgas (CHENG *et al.*, 2021). O cultivo de microalgas se destaca como uma alternativa promissora dentre essas tecnologias, devido à sua versatilidade de uso, que abrange a produção de alimentos, nutracêuticos, biocombustíveis, biofertilizantes, bioestimulantes, biochar e ração animal (CASTRO *et al.*, 2020). Além disso, as microalgas possuem uma capacidade significativa de remoção de CO₂, sua taxa teórica de fixação pode atingir cerca de 1800 t/ha ano, cerca de 50 vezes mais do que o sequestro realizado por plantas terrestres (WU *et al.*, 2023; XU *et al.*, 2019). Comparadas a outras biomassas, as microalgas tem uma

grande vantagem devido a sua alta produtividade, resultado de um crescimento rápido, alta eficiência fotossintética e habilidade de utilizar nutrientes de forma eficaz. Adicionalmente, esses micro-organismos requerem menos área para o seu cultivo, sendo possível, utilizar terras não-aráveis, evitando a competição com culturas alimentares de maior importância para a produção agrícola (MAGHZIAN *et al.*, 2023).

No setor agrícola, a busca por uma agricultura mais sustentável que atenda a crescente demanda por alimento representa um desafio prioritário. Nesse contexto, os biofertilizantes desempenham um papel crucial para substituir os fertilizantes químicos tradicionais. Dentre os fertilizantes orgânicos, as formulações derivadas de microalgas tem se destacado pela capacidade de melhorar a biodisponibilidade de nutrientes, aumentar a fertilidade do solo e promover maior rendimento das culturas (CAO *et al.*, 2023; KOKILA *et al.*, 2023). No entanto, apesar do potencial ecológico da produção destes biofertilizantes, ainda existem alguns desafios a serem enfrentados. Castro *et al.* (2020) realizaram uma avaliação comparativa do ciclo de vida (ACV) entre biofertilizantes de microalgas e o fertilizante químico TSP (Superfosfato Triplo). Neste estudo foi constatado que o biofertilizante apresenta um impacto ambiental maior do que o TSP. Isso ocorreu, principalmente, devido ao consumo energético maior no processo de produção do biofertilizante.

Diante dessas constatações, otimizar o ciclo produtivo dos biofertilizantes, a fim de obter um melhor entendimento dos impactos ambientais, é essencial para torná-los mais competitivos no mercado. Nesse sentido, a realização da avaliação do ciclo de vida (ACV) desempenha um papel fundamental. Essa metodologia permite avaliar o impacto ambiental de um produto, identificar os pontos críticos e caracterizar todas as entradas e saídas ambientais associadas às atividades em estudo (HAUSCHILD; ROSENBAUM; OLSEN, 2018). Além disso, a ACV engloba análises de energia, emissão de CO₂ e análise de custo do ciclo de vida, avaliações que auxiliam na tomada de decisões (DASAN *et al.*, 2019).

Estudos mais abrangentes dos impactos ambientais e do potencial da produção de biofertilizantes de microalgas em larga escala são incipientes na literatura. Portanto, é crucial desenvolver uma investigação detalhada sobre a produção de biofertilizantes de microalgas em grande escala, com foco específico nas rotas de fluxo de CO₂ do sistema, além de realizar uma Análise de Ciclo de Vida (ACV). Essas abordagens proporcionarão uma visão mais completa e embasada para orientar as decisões relacionadas à produção sustentável desses produtos.

REFERÊNCIAS

CAO, Thanh Ngoc Dan *et al.* Roles of microalgae-based biofertilizer in sustainability of green agriculture and food-water-energy security nexus. **Science of the Total Environment** v. 870, n. January, p. 161927 , 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161927>>.

CASTRO, Jackeline de Siqueira *et al.* Microalgae based biofertilizer: A life cycle approach. **Science of The Total Environment** v. 724, p. 138138 , jul. 2020. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S004896972031651X>>.

CHENG, Yoke Wang *et al.* Unravelling CO₂ capture performance of microalgae cultivation and other technologies via comparative carbon balance analysis. **Journal of Environmental Chemical Engineering** v. 9, n. 6, p. 17 , 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106519>>.

DASAN, Yaleeni Kanna *et al.* Life cycle evaluation of microalgae biofuels production: Effect of cultivation system on energy, carbon emission and cost balance analysis. **Science of the Total Environment** v. 688, p. 112–128 , 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.181>>.

FRIEDLINGSTEIN, Pierre *et al.* Global Carbon Budget 2022. **Earth System Science Data** v. 14, n. 11, p. 4811–4900 , 2022.

HAUSCHILD, Michael Z.; ROSENBAUM, Ralph K.; OLSEN, Stig Irving. **Life cycle assessment**. [S.l: s.n.], 2018. 29–42 p. 11 v.9783319564746.

IPCC. Section 4: Near-Term Responses in a Changing Climate. **Climate Change 2023: Synthesis Report** p. 42–66 , 2023.

KOKILA, Venkatesh *et al.* Biocatalysis and Agricultural Biotechnology Elevated CO₂ modulates the metabolic machinery of cyanobacteria and valorizes its potential as a biofertilizer. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology** v. 50, n. January, p. 102716 , 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.bcab.2023.102716>>.

MAGHZIAN, Ali *et al.* How to effectively produce value-added products from microalgae? **Renewable Energy** v. 204, n. December 2022, p. 262–276 , 2023.

Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.12.100>>.

MOHAPATRA, Ranjan Kumar *et al.* Bio-inspired CO₂ capture and utilization by microalgae for bioenergy feedstock production: A greener approach for environmental protection. **Bioresource Technology Reports** v. 19, n. June, p. 101116 , 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101116>>.

WU, Wenbo *et al.* Advancements on process regulation for microalgae-based carbon neutrality and biodiesel production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** v. 171, n. June 2022, p. 112969 , 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112969>>.

XU, Xianzhen *et al.* Progress, challenges and solutions of research on photosynthetic carbon sequestration efficiency of microalgae. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** v. 110, n. April, p. 65–82 , 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.050>>.

2. OBJETIVO

Avaliar o potencial do cultivo da microalga *Scenedesmus obliquus* BR003 como tecnologia de sequestro de carbono, associada à produção de biofertilizante, incluindo os impactos de sua utilização no solo.

2.1. Objetivos Específicos

- I. Realizar um balanço de carbono da produção e utilização do biofertilizante de microalga, destacando o percentual de recuperação e fixação.
- II. Avaliar os impactos ambientais do processo de produção do biofertilizante de microalgas por meio da Avaliação de ciclo de vida (ACV) e comparar os cenários de utilização do biofertilizante no solo, a fim de identificar pontos críticos e propor soluções de otimização do sistema.

CAPÍTULO I: PRODUÇÃO E AVALIAÇÃO DE BIOFERTILIZANTES DE MICROALGAS, COM ÊNFASE NA PEGADA DE CARBONO

RESUMO

As microalgas da espécie *Scenedesmus obliquus*, são notáveis por seu rápido crescimento e resistência a condições adversas, tornando-as ideais para cultivo em larga escala. Capazes de prosperar em altas concentrações de CO₂, essas microalgas são uma alternativa promissora para o sequestro de carbono, ajudando a mitigar as emissões atmosféricas de CO₂. Além disso, a *S. obliquus* pode ser usada na produção de biofertilizantes ricos em nutrientes, oferecendo uma solução sustentável comparada aos fertilizantes químicos tradicionais, que causam degradação ecológica. Neste estudo, a *S. obliquus* foi cultivada em um tanque do tipo *mixing board*, com a injeção de CO₂ de gás de combustão com o objetivo de avaliar seu potencial tanto para sequestro de carbono quanto para produção de biofertilizantes e seus efeitos no solo. Foram injetados semanalmente 595 g de CO₂, resultando em uma produção de 0,16 g/L. O biofertilizante continha 50% de carbono orgânico, além de outros compostos relevantes, como lipídeos, carboidratos, proteínas, cinzas e nutrientes essenciais, como N, P e K. Um experimento com milho foi realizado com 6 tratamentos e 5 repetições, onde apenas os tratamentos T2 (biofertilizante com P e K inorgânicos) e T4 (NPK inorgânico) mostraram eficácia no desenvolvimento da cultura, fornecendo nutrientes adequados e resultando em maior massa seca. O tratamento T2 se destacou por sua capacidade de reter carbono no solo, aumentando o conteúdo de carbono, enquanto o T4 reduziu os níveis de carbono. A análise revelou que *S. obliquus* fixou 75% do CO₂ injetado, com 50% de carbono orgânico no biofertilizante. Quando aplicado ao solo, 5,84 g do biofertilizante forneceram 2,92 g de carbono, resultando na imobilização de 7,42 g de carbono. Esses resultados evidenciam a eficácia das microalgas na mitigação das mudanças climáticas e na promoção de práticas agrícolas sustentáveis.

Palavras-chave: *Secenesdesmus obliquus*. Sequestro de CO₂. Milho.

1. INTRODUÇÃO

As microalgas pertencentes ao gênero *Scenedesmus* (*Sphaeropleales*, *Scenedesmaceae*) se sobressaem entre uma estimativa de mais de 300.000 espécies de microalgas conhecidas. Esse gênero é um dos mais comuns dentre as microalgas verdes de água doce (OLIVEIRA *et al.*, 2021). De acordo com Garrido-Cardenas *et al.* (2018), *Scenedesmus* é o terceiro gênero mais frequentes em artigos publicados, superando os gêneros *Nannochloropsis* e *Spirulina* (cianobactéria).

Dentro da família *Scenedesmaceae*, a espécie *Scenedesmus* (*Tetradesmus*) *obliquus* é particularmente notável. Seu rápido crescimento e a alta resistência a condições adversas, tornam-na especialmente atraente para o cultivo em larga escala. Diversos estudos têm demonstrado a capacidade da *S. obliquus* de prosperar em ambientes com diferentes contaminantes, evidenciando sua eficiência na remoção de antibióticos, estimulantes e produtos farmacêuticos, como o paracetamol (ISMAGULOVA *et al.*, 2018; OLIVEIRA *et al.*, 2021; REMPEL *et al.*, 2023; ZHOU *et al.*, 2014).

No cultivo em larga escala, os tanques abertos são mais utilizados devido ao seu menor custo e à facilidade de operação. No entanto, estes apresentam limitações, como a alta suscetibilidade à contaminação por bactérias, protozoários e outras espécies de microalgas. Além disso, esses tanques apresentam baixa produtividade quando comparados aos sistemas fechados, e são vulneráveis a oscilações de temperatura, irradiância e disponibilidade de CO₂ (OLIVEIRA *et al.*, 2021).

Para alcançar maiores produtividades, é essencial fornecer ao cultivo o nutriente de maior demanda em massa: carbono, sendo usualmente disponibilizado pela injeção de CO₂ nos tanques. A eficiência fotossintética das microalgas, diretamente influenciada pela concentração de CO₂ disponível, é crucial para obter-se elevadas taxas de crescimento. A concentração de CO₂ na atmosfera é limitada para a fotossíntese, e estudos indicam que o aparato fotossintético das microalgas está adaptado a concentrações mais altas de CO₂ (SOLOVCHENKO; KHOZIN-GOLDBERG, 2013).

A pesquisa conduzida por Sinha *et al.* (2023) avaliou a resistência de quatro linhagens de *Tetradesmus* a diferentes concentrações de CO₂ revelando que um aumento para 20% em volume de CO₂ no ar (200.000 ppm de CO₂) permitiu a

sobrevivência de três das quatro linhagens, sendo que uma delas não apenas resistiu à alta concentração de CO₂, mas também apresentou um crescimento significativo.

O cultivo de microalgas não apenas se destaca como uma tecnologia efetiva para a sequestro de CO₂, mas também demonstra um potencial de transformação em uma variedade de produtos, incluindo biofertilizantes ricos em nutrientes. Essa versatilidade traz vantagens tanto ambientais quanto para a implementação de práticas agrícolas mais sustentáveis, contribuindo para a redução dos impactos associados ao uso de fertilizantes químicos (RENUKA *et al.*, 2018). A dependência de fertilizantes químicos representa um problema agrícola significativo, pois seu uso contínuo resulta em degradação ecológica global (FERREIRA, ALICE *et al.*, 2019; PEREIRA, 2021). Além de serem mais sustentáveis do que os fertilizantes tradicionais, o uso de biofertilizantes à base de microalgas promove inúmeras melhorias para o solo, como controle da erosão, aumento da atividade enzimática e microbiologia do solo, produção de substâncias promotoras de crescimento, diminuição da perda de nutrientes por lixiviação, através de uma liberação lenta e consistente destes (BRAUN; COLLA, 2023; GATAMANENI LOGANATHAN; ORSAT; LEFSRUD, 2020; RENUKA *et al.*, 2018)

Portanto, a presente pesquisa visou explorar o potencial do cultivo de microalgas como uma tecnologia de sequestro de carbono associada à produção de biofertilizantes. Foram investigados a eficiência do processo e os benefícios ambientais envolvidos, desde o cultivo das microalgas até a obtenção do produto final, o biofertilizante, avaliando também seu impacto no desenvolvimento das culturas.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Cultivo das Microalgas

O estudo foi conduzido no Laboratório de Biocombustíveis da Universidade Federal de Viçosa (UFV), situado em Viçosa, Minas Gerais, Brasil (coordenadas 20°46'14,20" S, -42°52'21,45" O). As microalgas da linhagem *Scenedesmus obliquus* BR003, foram cultivadas em um tanque aberto do tipo *mixing board* com capacidade de 4000L. Esse tipo de sistema utiliza uma placa de mistura que se desloca ao longo de toda a extensão do tanque, promovendo a mistura com baixo consumo de energia (MARTINS, *et al.*, 2021, Patent No. US20210345570A1).

Esse tanque está alocado em uma casa de vegetação, proporcionando condições fotoautotróficas com iluminação natural e temperatura média entre 19 e 26 °C. A mistura no tanque de cultivo foi conduzida por meio de um sistema propelido por energia solar fotovoltaica com potência de 1,055kWh (Figura 1). Esse sistema permaneceu ligado 12 horas por dia durante toda a semana de cultivo e o consumo energético total foi de 3,81 MJ em 7 dias.

Figura 1 – Tanque *mixing board* com sistema propelido por energia solar fotovoltaica.



Fonte: Acervo do Laboratório de Biocombustíveis do DEA-UFV.

A produção de biomassa ocorreu entre 15 de setembro e 22 de outubro de 2023. Cada cultivo teve duração de 7 dias, repetido ao longo de três semanas não

consecutivas, com a coleta realizada no sétimo dia de cada ciclo de cultivo. O meio de cultura do tanque foi formulado utilizando água da rede de abastecimento e com base nos fertilizantes descritos por Rocha *et al.*, (2019). O carbono, proveniente de uma fonte estacionária gasosa, foi introduzido na forma de dióxido de carbono (CO₂) por meio de injeção direta no cultivo.

Os cultivos em escala piloto foram monitorados quanto à produtividade de biomassa, teor de carbono e presença de toxinas. O crescimento das microalgas foi acompanhado diariamente por meio da coleta de amostras em quatro pontos aleatórios do tanque. Posteriormente, as amostras foram submetidas a leituras no comprimento de onda 750 nm, para obter a densidade óptica, utilizando o espectrofotômetro (Hach, DR6000, Estados Unidos).

Foi feita a determinação da biomassa seca livre de cinzas conforme a metodologia proposta por Griffiths *et al.* (2011). A equação 1 apresenta a correlação entre a absorbância no comprimento de onda de 750 nm e a concentração de biomassa seca livre de cinzas (g/L).

$$y = 0,686 x - 0,0094 \quad (R^2 = 0,9831) \quad (1)$$

em que,

y – valor da absorbância (OD_{750nm});

x – valor da biomassa seca livre de cinzas (g/L);

R² – é o coeficiente de correlação.

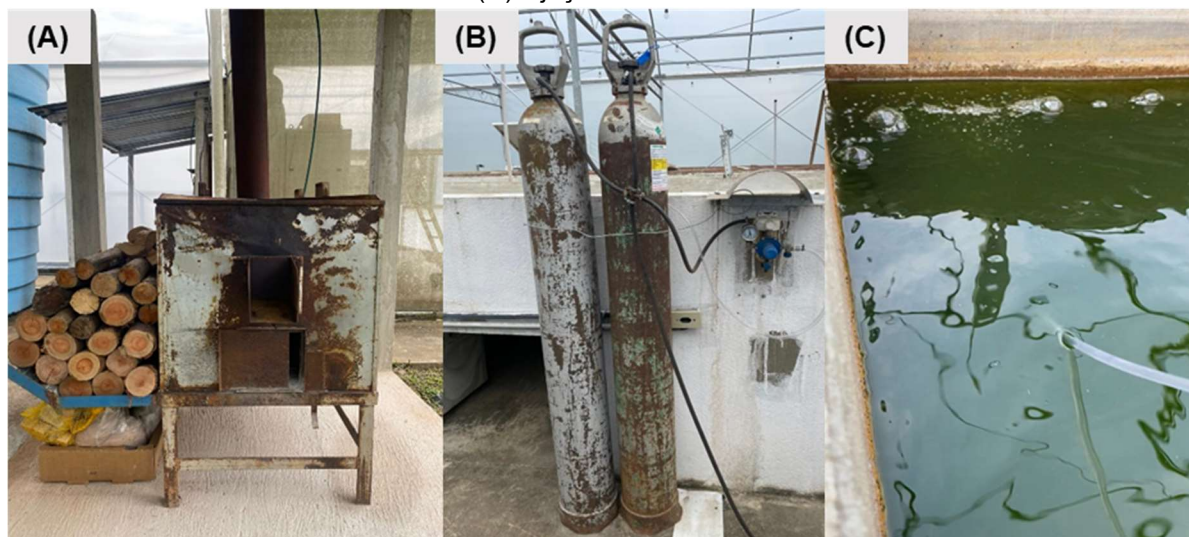
2.2. Produção e Injeção do Dióxido Carbônico (CO₂)

O dióxido de carbono (CO₂) foi gerado por meio da combustão de biomassa florestal de madeira de eucalipto em um incinerador (Figura 2A). Durante o processo de combustão, a biomassa era introduzida no incinerador e queimada até atingir a temperatura de 750 °C. Nesse momento, os gases gerados na câmara de combustão são oxidados a CO₂ e H₂O (HENRIQUES, 2004). Após a remoção de condensáveis e particulados, a emissão gasosa se torna transparente, restando CO₂ e o excesso de ar da combustão (O₂ e N₂).

Esse processo foi realizado três vezes por semana ao longo de cada semana durante o período de experimento. Após atingir a temperatura de 750°C, um

compressor era ativado para comprimir o gás de combustão e encher dois cilindros de 50 litros cada, atingindo uma pressão de 8 bar. A injeção de CO₂ no tanque foi feita diariamente abrindo um dos cilindros pela manhã (Figura 2B). O gás foi introduzido no tanque de cultivo de maneira gradual, por meio de borbulhamento através de uma pedra porosa, até o final da tarde (Figura 3C). A composição do gás armazenado nos cilindros apresentou 12% (v/v) de CO₂, resultado em uma injeção diária de 85 g de CO₂, totalizando 595 g de CO₂ injetado semanalmente por cultivo. A concentração de CO₂ no gás de combustão foi quantificada em um analisador de gás por infravermelho próximo (Gasboard 3100, Wuhan Cubics, China).

Figura 2 – Produção e injeção de CO₂: (A) queima no incinerador, (B) armazenamento em cilindros e (C) injeção no cultivo.



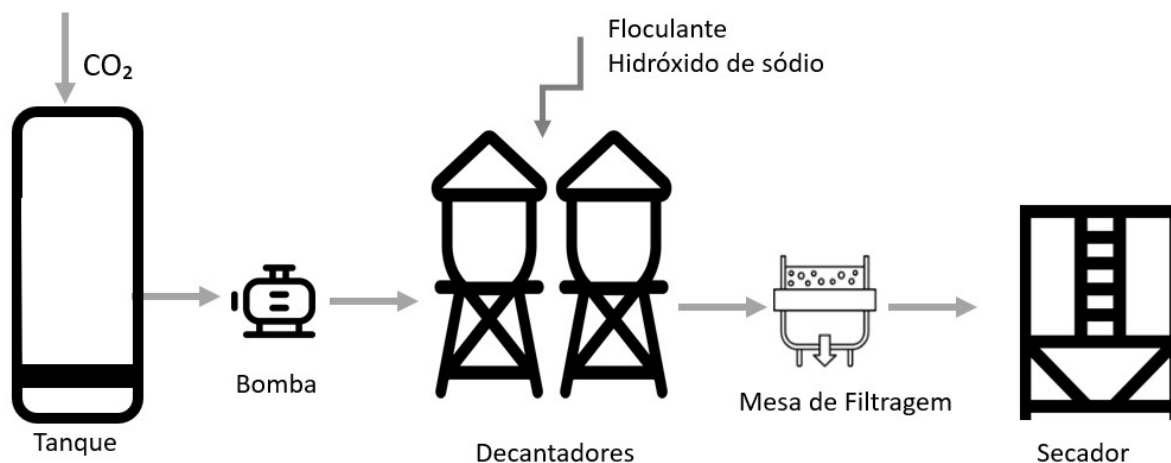
Fonte: A autora.

2.3. Coleta da Biomassa

O processo de coleta da biomassa de microalga foi feito em 3 etapas. O cultivo foi bombeado para um decantador, no qual foi adicionado hidróxido de sódio (NaOH) para ajustar o pH do cultivo para próximo de 9 e um floculante (Poliamina Catiônica, SNF Floerger, França) para concentrar a biomassa por floculação, formando flocos por meio da agitação manual. Etapa importante para reduzir o consumo de água que apresenta um gasto expressivo no cultivo. Após 1 hora de repouso para permitir a sedimentação dos flocos, a biomassa úmida foi coletada e transferida para uma mesa de filtração, revestida com uma membrana filtrante, para retirar o excesso de água. Em seguida, a biomassa úmida e concentrada foi coletada e disposta em bandejas

para o processo de secagem. As etapas subsequentes estão apresentadas no fluxograma mostrado na Figura 3.

Figura 3 – Fluxograma das etapas da coleta da biomassa de microalgas.

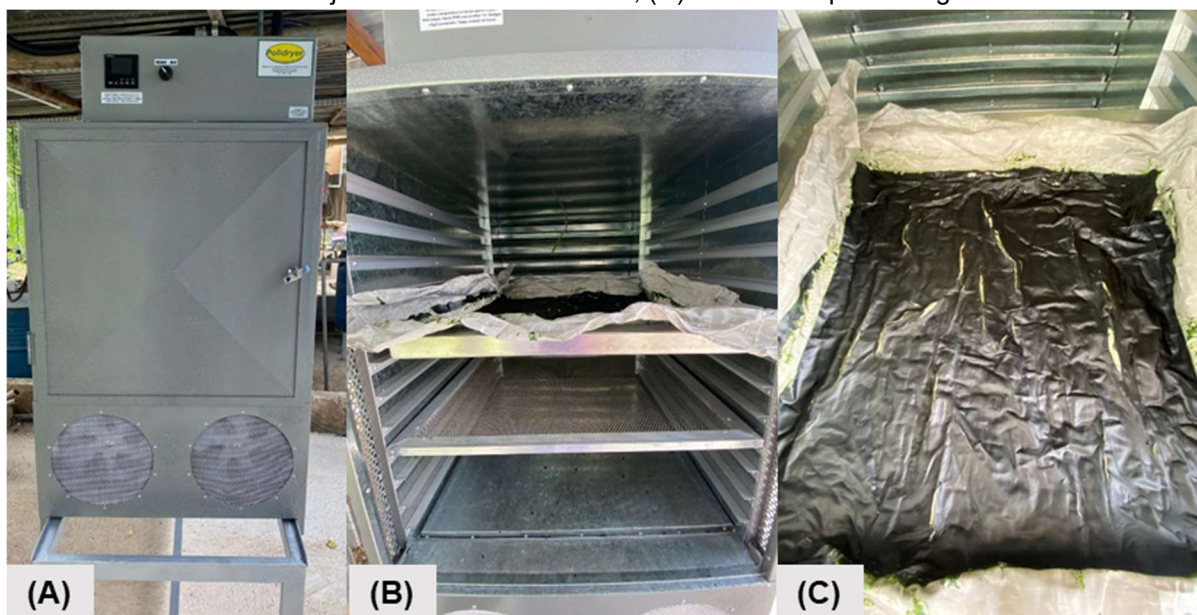


Fonte: A autora.

2.4. Secagem da Biomassa

O processo de secagem da biomassa foi realizado utilizando o secador (Polidryer, PD-60, Brasil, Figura 4A). O processo operacional teve a duração de 24 horas, a uma temperatura de 65°C para cada biomassa. A Figura 4B ilustra o interior do secador, destacando a posição da bandeja contendo a biomassa úmida. Já na Figura 4C, é possível observar a biomassa seca após o término do processo de secagem.

Figura 4 – Processo de secagem da biomassa. (A) Secador, (B) interior do secador, posicionamento da bandeja com a biomassa úmida, (C) biomassa após secagem.



Fonte: A autora.

2.5. Obtenção do Biofertilizante de microalgas

Após a retirada do secador, cada biomassa foi triturada no Moinho de Jarro (Solab Científica, SL-34/T, Brasil), até atingir uma consistência de pó. Esse processo foi repetido para as 3 diferentes biomassas correspondentes a cada ciclo de cultivo.

Em seguida, cada amostra foi passada em uma sequência de peneiras com malhas de 2,0 mm, 0,84 mm e 0,3 mm, para homogeneização, conforme a Instrução Normativa 61/2020 do Ministério da Agricultura do Abastecimento e da Reforma Agrária (MAPA). Essa normativa dispõe sobre as exigências e especificações granulométricas necessárias para o registro de biofertilizantes (BRASIL, 2020). Por fim, as três biomassas foram combinadas para formar o biofertilizante, sendo retirada uma amostra de cada cultivo e uma da mistura para fins de caracterização.

2.6. Caracterização do Biofertilizante

O biofertilizante e as biomassas de cada cultivo foram caracterizadas quanto a sua composição bioquímica. O nitrogênio total Kjeldahl (NTK), os teores de cinzas e a determinação da umidade das amostras seguiram a metodologia estabelecida pela APHA (2017). Os teores de lipídios totais foram identificados utilizando o método gravimétrico proposto por Schmid-Bondzynski-Ratzlaff (INTERNATIONAL

STANDARD, 1987). As proteínas totais foram calculadas pela multiplicação dos teores de nitrogênio total Kjeldahl (NTK) pelo fator 5,89, conforme descrito por Afify *et al*, (2018). Os teores de carboidratos foram determinados por diferença.

A análise do carbono orgânico total (TOC) foi conduzida utilizando um analisador de carbono (Shimadzu, TOC 5000A, Brasil), equipado com um catalisador de sensibilidade normal. Inicialmente, 0,02 g das amostras foram pesadas em barquinhas, um tipo específico de amostrador projetado para o equipamento, previamente calcinadas a 500°C. Em seguida, as barquinhas foram colocadas uma a uma no equipamento. Este dispositivo quantifica a quantidade de carbono total (TC) e carbono inorgânico (IC) na amostra, sendo o TOC a diferença entre TC e IC. Para determinar o TC, a amostra foi disposta em um tubo de combustão a 900°C contendo platina suportada em alumina, onde sofre oxidação catalítica para CO₂. O IC foi determinado pela reação da amostra com ácido fosfórico a 25%, convertendo todo o carbono inorgânico em CO₂. A quantidade de CO₂ produzida nessas reações é quantificada por absorção no infravermelho não dispersivo.

Os elementos essenciais para o crescimento e desenvolvimento das plantas foram determinados por meio da análise elementar da biomassa, seguindo metodologia de preparo das amostras conforme Marcos *et al*, (2009). Após a digestão, as concentrações elementares de potássio (K), fósforo (P), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S), cobre (Cu), ferro (Fe), zinco (Zn), manganês (Mn), boro (B) e sódio (Na) foram obtidas utilizando um Espectrômetro de Emissão de Plasma (PerkinElmer, ICP-OES OPTIMA 8300 DV, Estados Unidos).

2.7. Coleta, caracterização e preparo do Solo

O solo utilizado no experimento foi coletado no Campus da Universidade Federal de Viçosa. As análises das características químicas do solo foram realizadas pelo Laboratório de Fertilizantes do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa, cujos resultados estão apresentados na Tabela 1. Trata-se de um argilo-solo, com baixa fertilidade e pH de 6,60.

Tabela 1 – Caracterização química do solo

pH	MO	N	P	K	Ca	Mg	H + Al	SB	Al	t	T	P-rem
H ₂ O	dag/kg		mg/dm ³			cmolc /dm ³				cmolc /dm ³		mg/L
6,60	1,06	-	1,90	68	1,80	0,71	1,4	2,68	0	2,07	4,37	16.5

V	m	ISNa	S	Cu	Fe	Zn	Mn	B	Cr	Ni	Cd	Pb
	%						mg/dm ³					
65,7	0	-	33,9	2,96	35,2	4,96	26,3	0,3	-	-	-	-

pH em água, MO - matéria orgânica; H + Al - acidez potencial; SB = Soma de Bases Trocáveis; t - Capacidade de Troca Catiônica Efetiva; T - Capacidade de Troca Catiônica a pH 7,0; P-rem = Fósforo Remanescente; V - Índice de Saturação por Bases; m= Índice de Saturação por Alumínio; ISNa - Índice de Saturação por Sódio; não foi detectado sódio (Na).

Após coletado, o material foi seco ao ar livre destorroado e peneirado em peneira com malha de 2 mm, para remover pedras, folhas e raízes de grama, obtendo a terra fina seca ao ar (TFSA), que totalizou 300 litros de solo. A correção da acidez foi feita por calagem utilizando um calcário agrícola dolomítico. Após 15 dias de incubação, o solo foi novamente seco ao ar, destorroado, peneirado em peneira de 2 mm e transferido para vasos de 7 litros cada.

Uma amostra de solo foi coletada antes do transplante para os vasos, para obter o teor inicial de carbono do solo antes do cultivo, seguindo a metodologia adaptada de Yeomans & Bremner, 1988 (MENDONÇA; MATOS, 2017).

2.8. Delineamento experimental e aplicação do biofertilizante no solo

A cultura escolhida para o estudo foi o milho (*Zea mays*), cultivado em vasos de 7 litros dentro da casa de vegetação. O experimento foi instalado em delineamento inteiramente casualizado (DIC, Tabela 2), com 6 tratamentos e 5 repetições. A recomendação agrícola para cada tratamento foi baseada nas necessidades da cultura do milho, de acordo com a 5ª Aproximação (RIBEIRO; GUIMARÃES; ALVAREZ V, 1999), e os resultados obtidos experimentalmente.

Tabela 2 – Delineamento experimental

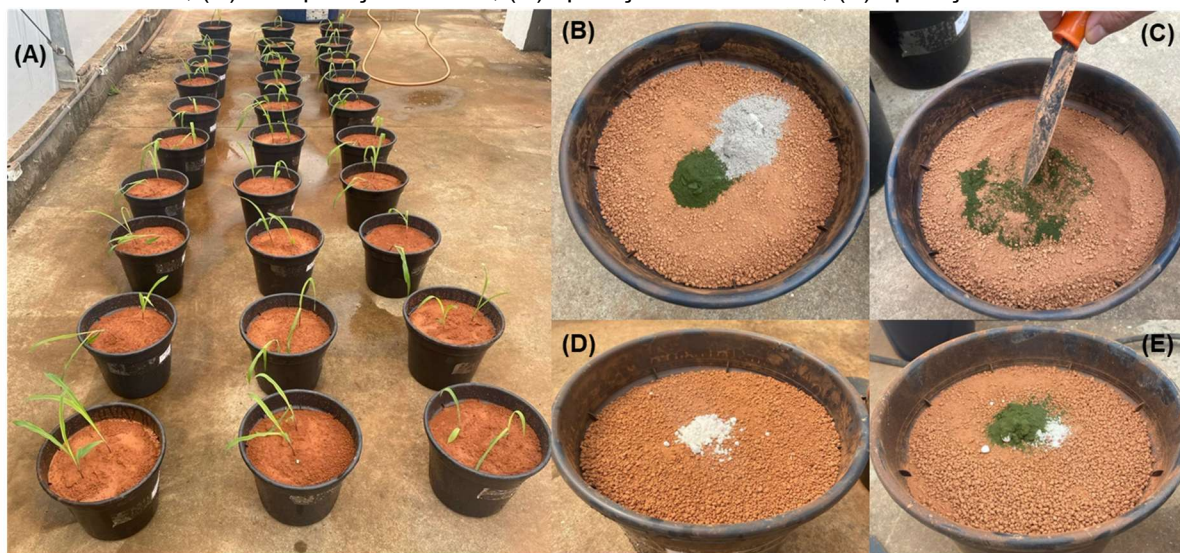
Tratamentos	
T1	Microalgas
T2	Microalgas + suplementação de P e K inorgânico
T3	Microalgas + cinzas
T4	Controle Positivo (NPK inorgânico)
T5	Controle Positivo (Cinzas)
T6	Controle negativo (apenas solo)

O primeiro tratamento (T1) consistiu somente no uso do biofertilizante de microalgas em forma de pó. Para o T2, o biofertilizante foi combinado com fertilizantes

super simples e cloreto de potássio, a fim de atender às necessidades de fósforo e potássio, respectivamente. No tratamento T3, cinzas de eucalipto provenientes do incinerador foram adicionadas ao biofertilizante como alternativa de suprimento da necessidade de K. Essas cinzas, foram obtidas durante o processo de produção de CO₂ (item 2.2), e armazenadas para reutilização nessa etapa de plantio. As cinzas foram peneiradas e homogeneizadas e, posteriormente, foram digeridas utilizando uma metodologia de digestão com ácido clorídrico para a determinação das concentrações elementares de potássio (K), fósforo (P), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S), cobre (Cu), ferro (Fe), zinco (Zn), manganês (Mn), boro (B) e sódio (Na) utilizando um Espectrômetro de Emissão de Plasma (PerkinElmer, ICP-OES OPTIMA 8300 DV, Estados Unidos).

Os tratamentos T4 e T5 foram os controles positivos, envolvendo NPK inorgânico e cinzas, respectivamente. O tratamento T6 serviu como controle negativo, consistindo apenas no solo. Em todos os tratamentos, a aplicação foi realizada na superfície do solo na parte central, seguida pela incorporação do material antes da rega com água potável (Figura 5).

Figura 5 – Aplicação e incorporação no solo. (A) Todos os tratamentos pós plantio, (B) aplicação do tratamento 3, (C) incorporação no solo, (D) aplicação tratamento 4, (E) aplicação tratamento 2.



Fonte: A autora.

Todos os tratamentos foram monitorados diariamente. A irrigação foi realizada manualmente com um regador sempre que necessário, mantendo a umidade constante dentro da capacidade de campo. Além disso, foi realizado o controle de ervas daninhas, pragas e doenças conforme a necessidade. Para avaliar o

crescimento das plantas, foram selecionados aleatoriamente 6 exemplares de cada tratamento, devidamente identificados, e as observações foram registradas.

2.9. Análises das plantas e solo final

Após 49 dias de cultivo, o experimento foi concluído e as plantas foram colhidas. A parte aérea de cada planta foi seccionada a 1,0 cm do solo, picotada e acondicionada em sacos de papel kraft para secagem em estufa a 65°C até atingir massa constante. Em seguida, foi determinada a produção de massa de matéria seca da parte aérea e o teor de carbono total.

A análise do carbono orgânico total da massa seca foi realizada através do método da mufla. Segundo o estudo de Do Carmo e Silva (2012), que comparou diferentes métodos de determinação de carbono em compostos orgânicos diversos, o método da mufla apresenta um elevado grau de associação entre matéria orgânica e carbono total.

Inicialmente, a massa seca foi moída utilizando um moinho analítico (Quimis, Q298A21, Brasil). Em seguida, realizou-se o procedimento para a obtenção de cinzas, onde o teor de carbono orgânico foi determinado pela diferença entre o peso inicial da amostra e o peso das cinzas.

Os teores de carbono no solo foram determinados seguindo a metodologia adaptada de Yeomans & Bremner (1988) (MENDONÇA; MATOS, 2017). Ao final do experimento, foram retiradas uma amostra de solo por repetição de cada tratamento. Essas amostras foram moídas e peneiradas em uma peneira de 0,250 mm (60 mesh), para posterior análise.

2.10. Alocação de Carbono

As rotas de entrada e saída de carbono no sistema de estudo foram alocadas em um fluxograma para demonstrar a eficiência do uso das microalgas na captura de CO₂, sua conversão em carbono orgânico e a imobilização deste no solo. O fluxograma foi elaborado com base nos dados experimentais, juntamente com informações da literatura disponível e seguindo a metodologia descrita por Cheng *et al.* (2021).

Na primeira parte do sistema, o tanque de cultivo, houve duas formas de entrada de CO₂. A primeira ocorreu diretamente através do gás de combustão (item 2.2), enquanto a segunda aconteceu indiretamente por meio do ar atmosférico, que possui uma concentração de CO₂ em torno de 0,036% (SINHA et al., 2023).

A captura de CO₂ aparente pelas microalgas, foi calculada através da taxa de biofixação aparente de CO₂ (R_{CO_2}), de acordo com a equação 2. Essa taxa representa a eficiência fotossintética das microalgas na fixação do CO₂.

$$R_{CO_2} = x_C * B * \frac{MW_{CO_2}}{MW_C} * \frac{1 d}{24 h} = 0,153 (x_C * B) \quad (2)$$

em que,

R_{CO_2} - Taxa de biofixação aparente de CO₂ (kg/m³.h);

x_C - Fração de carbono na biomassa de microalgas secas, medida pela análise final (%);

B - Produtividade da biomassa (g/(L.d));

MW_{CO_2} e MW_C - Massa molar do CO₂ (44 g/mol) e do carbono (12 g/mol), respectivamente.

Em relação as saídas de carbono do sistema, foi calculado a taxa líquida de perdas de CO₂ por meio da equação (3), que indica as perdas de CO₂, que não foi assimilado pelas microalgas.

$$\dot{m}CO_{2, liq} = \dot{m}CO_{2, total} - R_{CO_2} \quad (3)$$

em que,

$\dot{m}CO_{2, total}$ - Taxa de entrada de CO₂ total (kg/h);

$\dot{m}CO_{2, liq}$ - Taxa líquida de perdas de CO₂ (kg/h);

R_{CO_2} - Taxa de biofixação de CO₂ (kg/m³.h).

Além disso, os dados experimentais obtidos da conversão de CO₂ em carbono total presente no biofertilizante e o carbono orgânico imobilizado no solo foram alocados com o intuito de descrever as principais vias de recuperação e fixação de carbono.

2.11. Análise estatística

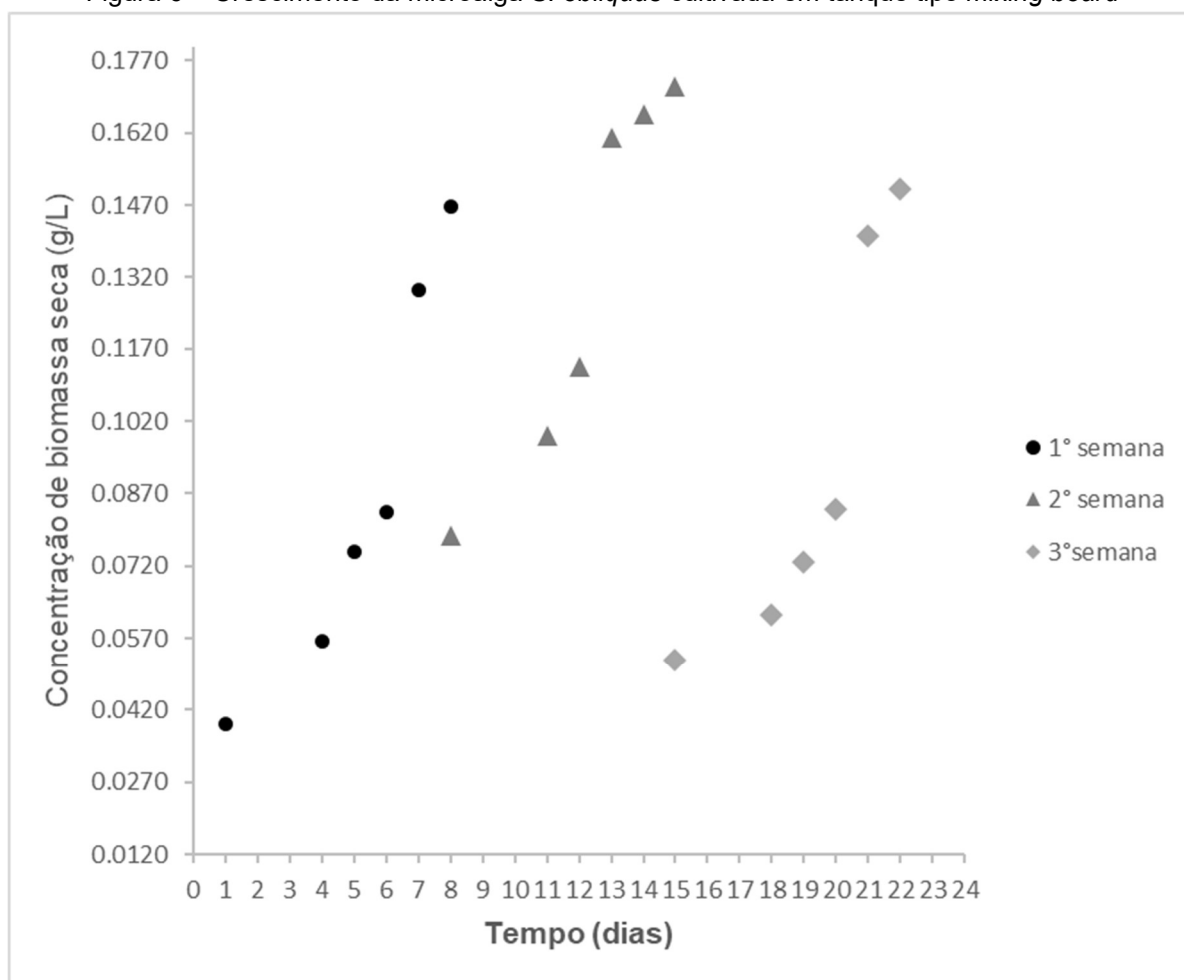
As curvas de crescimento, as análises de caracterização e as doses de aplicação por tratamento foram interpretadas por estatística descritiva e expressas em valores médios \pm desvio padrão entre experimentos. Os resultados referentes ao carbono no solo, massa seca das plantas e carbono da massa seca foram submetidos à análise da variância (ANOVA) unidirecional, e as médias de tratamentos comparadas pelo teste de Tukey com nível de significância de 5%, por meio do programa SigmaPlot 15,0.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Crescimento e monitoramento do cultivo

Na figura 6 estão apresentados os resultados da concentração de biomassa livre de cinzas em (g/L) para cada semana de cultivo. A produtividade média dos cultivos foi de 0,16g/L.

Figura 6 – Crescimento da microalga *S. obliquus* cultivada em tanque tipo *mixing board*



No gráfico, fica evidente que, do primeiro ao quarto dia (concentrações de 0,06 a 0,105 g/L) a taxa de crescimento das microalgas foi menor, indicando a fase de lag. Do quarto até o sexto dia houve um crescimento exponencial, indicando a fase exponencial. O crescimento da *S. obliquus* está alinhado com descobertas de pesquisas anteriores que abordam o crescimento de microalgas com a introdução de dióxido de carbono (AJALA; ALEXANDER, 2020; GHARANJIK *et al.*, 2024; MA *et al.*, 2019; TAN *et al.*, 2024).

Esse comportamento pode ser atribuído à disponibilidade de nutrientes no meio. Inicialmente, há uma quantidade abundante de nutrientes para as microalgas assimilarem. À medida que os nutrientes se esgotam, o crescimento torna-se limitado, juntamente com o auto-sombreamento das microalgas, que reduz a penetração da luz solar, levando à fase de estabilização do cultivo (LOURENÇO, 2006).

Os cultivos semanais exibiram comportamentos bastante similares. No entanto, o segundo se destacou por apresentar as maiores produtividades (Fig. 6), possivelmente devido ao maior acúmulo de inóculo no fundo do tanque, uma vez que a limpeza foi realizada antes do primeiro e do terceiro cultivos.

Estudos como o de Tan *et al.* (2024) demonstraram que o crescimento da *Scenedesmus obliquus* é diretamente influenciado pela disponibilidade de CO₂. Em todas as condições de cultivo testadas pelo estudo, aquelas com injeção de CO₂ apresentaram taxas de crescimento superiores às sem a injeção. Além disso, revelou que o CO₂ reduz os efeitos negativos de toxicidade do meio. No estudo atual, foram injetados diariamente 85 g de CO₂, totalizando 595 g por semana.

3.2. Caracterização da Biomassa

Os resultados da caracterização da biomassa de cada cultivo, quanto a sua composição bioquímica, estão apresentados na Tabela 3. Os valores de carbono orgânico total, em termos percentuais, corresponderam a cerca de 50% da biomassa. Percebe-se que não houve grandes variações entre os resultados de cada cultivo.

Os demais parâmetros, como proteínas, lipídeos, cinzas e carboidratos, apresentaram variações dentro do esperado, sendo influenciadas por fatores ambientais como a quantidade de luz, temperatura e meio de cultivo. Além disso, a variação progressiva do teor de cinzas pode ser explicada pelo acúmulo de inóculo no fundo do tanque ao longo dos diferentes cultivos.

Tabela 3 – Caracterização bioquímica da biomassa de cada cultivo. Médias seguidas do desvio padrão

Parâmetros	Cultivo 1	Cultivo 2	Cultivo 3
Carbono orgânico total (% , base seca)	50,00 ± 1,02E-03	49,00 ± 3,57E-03	48,00 ± 6,63E-04
Proteínas totais (Fator - 5,89) (% , base seca)	55,78 ± 2,62	54,53 ± 1,36	51,08 ± 2,91
Lipídeos totais (% , base seca)	13,19 ± 2,65	15,59 ± 1,44	13,55 ± 3,13
Cinzas (% , base seca)	3,40 ± 0,32	7,48 ± 0,42	9,78 ± 0,09
Carboidratos neutros (% , base seca)	27,64 ± 0,64	27,31 ± 3,44	22,26 ± 0,16

Ph	8,83	9,45	8,92
----	------	------	------

A caracterização bioquímica do biofertilizante, obtido pela combinação da biomassa de cada semana de cultivo, está apresentada na Tabela 4. Os resultados obtidos foram bastante semelhantes aos de cada cultivo individual (Tabela 3). Esses valores (Tabela 4) serviram como base para todo o estudo a partir deste ponto.

Tabela 4 – Caracterização bioquímica do biofertilizante. Médias seguidas do desvio padrão

Parâmetros	Resultados
Carbono orgânico total (% base seca)	50,00 ± 2,94E-04
Proteínas totais (Fator - 5,89) (% base seca)	55,58 ± 2,50
Lipídeos totais (% base seca)	15,61 ± 1,92
Cinzas (% base seca)	5,77 ± 0,05
Carboidratos neutros (% base seca)	23,04 ± 2,84
pH	9,07

O biofertilizante apresentou um teor de carbono orgânico total correspondente a 50,0% da massa seca. Esse resultado é bem similar com os valores encontrados por Faruque; Hossain; Razzak, 2023 e Abraham *et al.*, 2023, em pesquisas que também empregaram microalgas da família *Scenedesmaceae* e injeção de CO₂.

No estudo de Faruque; Hossain; Razzak, 2023, que avaliou o teor de carbono na biomassa final da microalga *Scenedesmus dimorphus* sob condições de cultivo com ar atmosférico e níveis variados de injeção de CO₂, percebeu-se uma diferença de aproximadamente 7% a mais de carbono na biomassa quando o nível de injeção de CO₂ era de 4%. Essas descobertas destacam o potencial relevante desse gênero de microalga em capturar o CO₂.

O teor de proteína total no biofertilizante foi de 55,58% (Tabela 4), um resultado bem semelhante ao encontrado por Rocha (2023) em condições de cultivo aberto iguais às presentes neste estudo, e também de Vendruscolo *et al.*, 2022 em fotobiorreator, ambos empregando a microalga *S. obliquus*, a mesma espécie desse trabalho. Este resultado demonstra que a *S. obliquus* mantém uma capacidade consistente de produzir altas quantidades de proteínas sob diferentes condições de cultivo.

O teor de lipídeos foi 15,61%, valor similar ao encontrado por Tan *et al.*, 2024 e Vendruscolo *et al.*, 2022. Na pesquisa realizada por Vendruscolo *et al.*, 2022, foi observado que a síntese de lipídeos em *S. obliquus* também é influenciada pela

concentração de CO₂ do meio, sendo que o maior teor de lipídeos encontrado por esse estudo foi de 15% na concentração de 20% de CO₂. Resultado muito interessante para a produção de energia, já que os lipídeos desempenham um papel crucial na produção de biocombustíveis, melhorando a sua qualidade e reduzindo os custos de produção (GAO *et al.*, 2023).

Os carboidratos representaram 23,04% da biomassa, valores bem próximos aos encontrados por Tan *et al.*, 2024. Esses compostos são fundamentais para a formação dos componentes estruturais das paredes celulares das microalgas, além de servirem como reservatórios de energia (GAO *et al.*, 2023). Já em relação ao teor de cinzas, foi 5,77% da biomassa, parâmetro que apresenta variação considerável na literatura disponível. Tanto o teor de cinzas quanto o de carboidratos variam consideravelmente devido às condições espaciais e temporais do cultivo, bem como aos processos pós-colheita (GAO *et al.*, 2023; JULICH *et al.*, 2019).

O pH médio do cultivo foi de 9,07, variando entre 8,83 e 9,45 ao longo do processo (Tabela 3). Embora o CO₂ tenha a tendência a acidificar o meio, o pH manteve-se dentro da faixa ideal para o crescimento da *S. obliquus*. Segundo MA *et al.*, 2019, essa espécie apresenta bom potencial de crescimento em um intervalo de pH entre 4,5 e 10,5.

3.3. Avaliação do biofertilizante no cultivo do milho

Os resultados da análise elementar do biofertilizante indicou que este possui 9,44% de nitrogênio, 3,62% de fósforo e 4,41% de potássio, que são os macronutrientes essenciais para o milho. Além desses, foram detectados 3,03% de Ca, 3,55% de Mg e 4,70% de S. Além de conter micronutrientes essenciais como Fe, Cu, Zn, Mn, B e Na.

Os teores de N, P e K deste estudo foram superiores aos de Sinha *et al.*, 2023 (8% N; 0,11% P; 0,57% K) e Álvarez-González *et al.*, 2022 (7,6% N; 1,6% P; 0,9% K). No primeiro estudo, a linhagem de *S. obliquus* foi utilizada em um meio de cultura BG11, enquanto o segundo utilizou espécies diversas de *Scenedesmus* em águas residuárias. Os resultados alcançados no presente estudo podem ser atribuídos à espécie utilizada (*S. obliquus*), à composição do meio de cultivo e à injeção de CO₂.

A partir dessa análise elementar, foi formulada a recomendação com base na necessidade de nitrogênio do milho, dado que este é o nutriente mais abundante no

biofertilizante. As doses dos tratamentos (T1, T2, T3, T4) foram estabelecidas para atender a 100% de N (Tabela 5). Para o biofertilizante foi aplicada uma dosagem de 5,84 g, correspondendo a 80 g de N/L de solo (Tabela 5). O tratamento T5 atuou como controle positivo, utilizando apenas cinzas. O T6 serviu como controle negativo, no qual não foi inserido nenhum material, apenas solo.

Tabela 5 – Nutrientes adicionados no solo na forma de microalga seca (biofertilizante) (T1), microalga + fertilizantes (T2), microalga + cinzas (T3), fertilizantes (T4), cinzas (T5) e o controle negativo (T6)

Nutriente	T1	T2	T3	T4	T5	T6
	mg/L de solo					
N	80,00	80,00	80,00	80,00	-	-
P	3,02	26,19	10,81	26,19	8,64	-
K	3,68	37,34	84,98	37,34	90,23	-
Ca	2,53	65,22	185,48	70,86	203,06	-
Mg	2,96	3,38	25,64	0,47	25,17	-
S	3,92	38,61	7,22	41,30	3,67	-
Cu	0,01	0,03	0,54	0,02	0,58	-
Fe	3,91	3,95	5,52	0,05	1,79	-
Zn	0,17	0,19	0,57	0,04	0,44	-
Mn	0,08	0,20	2,33	0,14	2,50	-
B	0,01	0,34	0,23	0,37	0,25	-
Na	0,46	1,80	7,61	1,49	7,93	-

Nos tratamentos T2 e T4 foram fornecidas ao milho as quantidades de fósforo e potássio necessárias para atender aos requisitos nutricionais da cultura. No tratamento T2 parte do P e K foi proveniente do biofertilizante. O quantitativo presente neste pode ser visto na Tabela 5 no tratamento T1, sendo completado o restante com os fertilizantes químicos super simples e KCl.

O tratamento T1, só com biofertilizante, atendeu apenas à necessidade de N da cultura, com teores de P e K bem inferiores aos requisitos nutricionais do milho. O T3, biofertilizantes e cinzas, também não supriu adequadamente a necessidade de P, enquanto a suplementação de K foi em excesso.

No tratamento controle positivo T5, apenas cinzas, após a análise elementar, não foram detectados teores de N. A recomendação foi baseada em K e P, semelhante ao T3, não conseguiu atender à necessidade de P e excedeu o teor de K. A adição de cinzas, como pode ser observado no T3 e T5 (Tabela 5), aumentou a disponibilidade de outros macronutrientes, como o cálcio (Ca) e magnésio (Mg), e alguns micronutrientes, como cobre (Cu) e manganês (Mn), além de aumentar consideravelmente o sódio (Na).

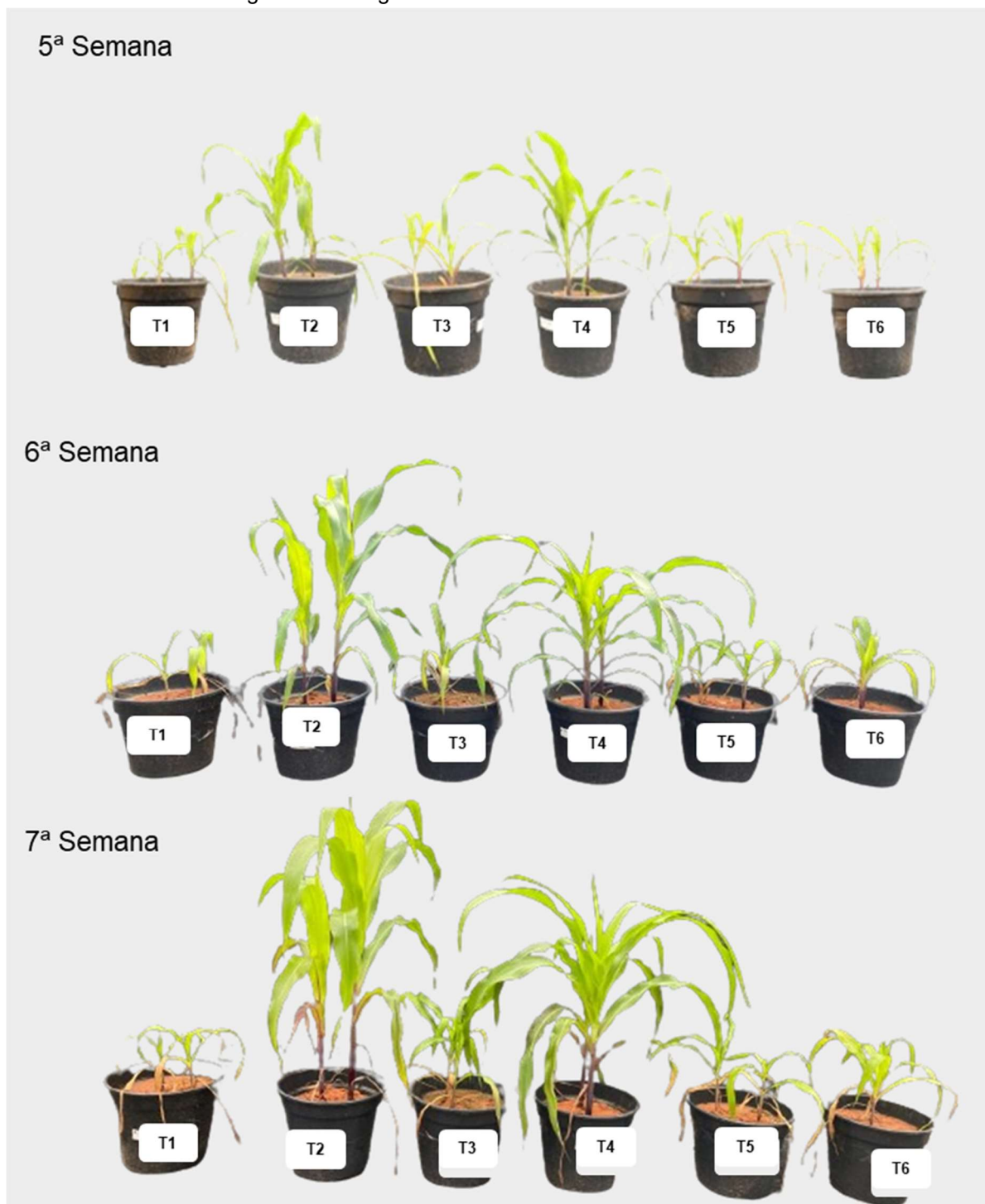
A adição de cinzas, conforme evidenciado nos tratamentos T3 e T5, proporcionou benefícios nutricionais adicionais, mas também apresentou desafios como o excesso de K, a insuficiência de P e o aumento de Na, fatores que podem afetar negativamente a qualidade do solo e o desenvolvimento da cultura.

De acordo com Valchev *et al.*, 2023, a *S. obliquus* acumula os principais macro e microelementos essenciais para o crescimento das plantas. Esse perfil elementar abrangente evidencia o seu potencial como biofertilizante. Além disso, não há registros de produção de toxinas por essa espécie, garantindo sua segurança como biofertilizante para solos e plantas. Sendo assim, do ponto de vista da disponibilidade de nutrientes e segurança, o tratamento T2 pode ser considerado o mais promissor.

3.3.1. Cultivo do milho

O cultivo do milho teve uma duração total de 7 semanas. Os registros fotográficos semanais de um exemplar de cada tratamento foram feitos aos longos das semanas, para documentar o crescimento e desenvolvimento das plantas. A Figura 7 apresenta os registros das 5^a, 6^a e 7^a semana de cultivo.

Figura 7 – Estágios de crescimento da cultura do milho.



T1 - microalgas

T2 - microalgas e fertilizantes (K e P)

T3 - microalgas e cinzas

T4 - Controle positivo NPK

T5 - Cinzas

T6 - Controle negativo, solo

Pela Figura 7, percebe-se uma diferença significativa nas alturas das plantas entre os tratamentos T2 e T4 em comparação com os demais, incluindo o tratamento

controle T6. Esse desenvolvimento superior é atribuído ao fornecimento adequado dos nutrientes N, P e K nos tratamentos T2 e T4. Embora as quantidades de N, P e K serem as mesmas para T2 e T4, o tratamento T2 destacou-se visivelmente (Fig. 6).

Pesquisas anteriores apontam que o biofertilizante de microalgas é considerado um fertilizante de liberação lenta (ALVARENGA *et al.*, 2023; CASTRO *et al.*, 2017; PEREIRA *et al.*, 2021; SHARMA *et al.*, 2021). Esses fertilizantes se caracterizam por fornecer de forma gradual os nutrientes às culturas ao longo do tempo, otimizando a assimilação de N e minimizando as perdas por lixiviação desse nutriente (SHARMA *et al.*, 2021).

Segundo Loganathan; Orsat; Lefsrud (2021), os resultados de crescimento mais expressivos das plantas tratadas com o biofertilizante podem ser atribuídos à presença de substâncias promotoras de desenvolvimento, como fitohormônios (auxinas, ácido giberélico e citocinas), bem como aos metabólitos secundários e à variedade de micronutrientes. Pereira *et al.* (2021) demonstraram que o uso de microalgas melhorou consideravelmente o estado nutricional da planta final, aumentando a concentração de micronutrientes.

No estudo de Nayak, Swain e Sen (2019), verificou-se que nos tratamentos com apenas fertilizante químico, as plantas consomem rapidamente os nutrientes devido à liberação inicial rápida destes, mas não atingem a maior altura, concluindo que os fertilizantes químicos não são suficientes para suprir a necessidade ideal de nutrientes nos estágios posteriores ao crescimento. Já a utilização exclusiva do biofertilizante de microalgas não fornece as quantidades adequadas de P e K, impactando o desenvolvimento do milho como pode ser observado no tratamento T1.

Nos tratamentos T3 e T5, houve uma piora no desenvolvimento da cultura ao longo das 3 semanas, conforme Figura 7. Isso pode ser devido a deficiência do suprimento de P, que está associado diretamente a diminuição do porte das plantas e a uma coloração arroxeada nas folhas mais velhas (FERREIRA, MAGNA MARIA MACEDO, 2012), o que também foi observado nesses tratamentos.

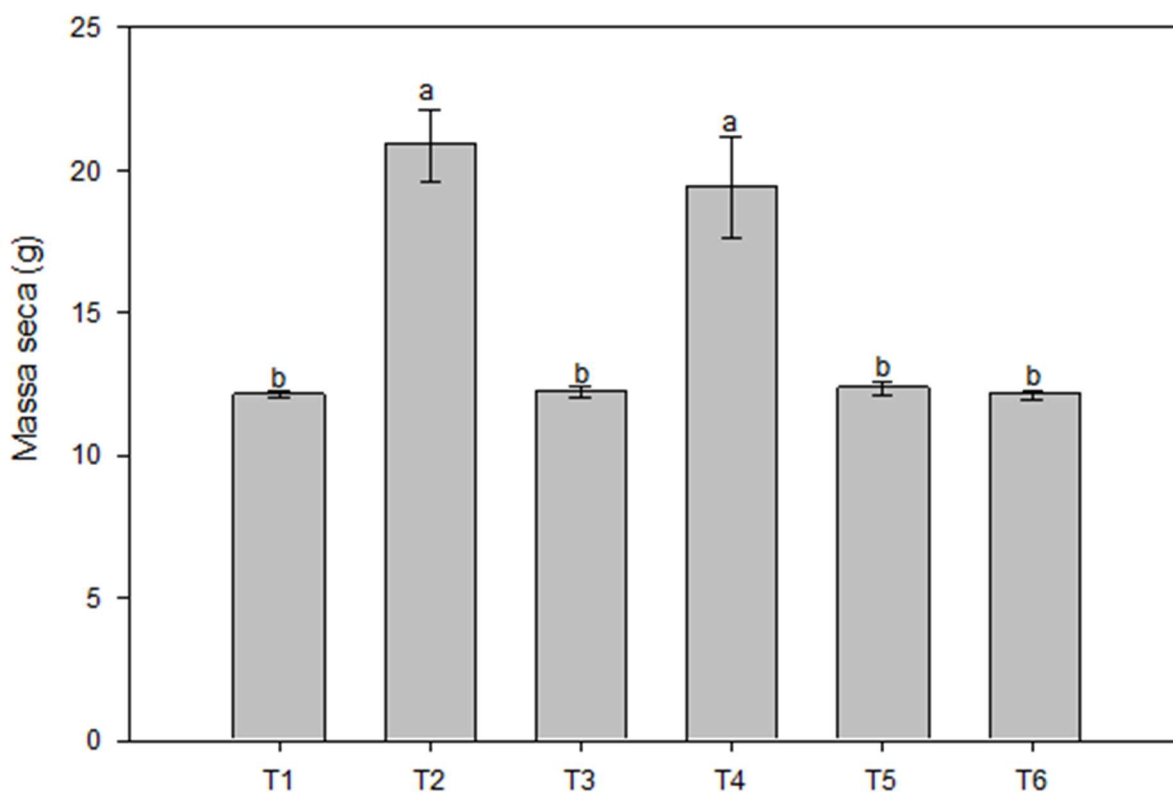
Diante do exposto, percebe-se que o melhor tratamento é o T2, com a combinação dos fertilizantes químicos e o biofertilizante. Esse tratamento se mostrou eficaz, pois além de suprir inicialmente os nutrientes essenciais, proporciona a liberação consistente dos nutrientes ao longo de todo o desenvolvimento, atendendo adequadamente às exigências da cultura.

Outro fator relevante observado por Jochum; Moncayo; Jo (2018), foi a altura superior das plantas tratadas com microalgas em comparação àquelas tratadas com ureia, o que demonstra o potencial das microalgas como um biofertilizante nitrogenado. Além dos benefícios para as plantas, o tratamento T2 reduz o uso de fertilizantes químicos e melhora a eficiência do uso de N, o que contribui para a redução do impacto ambiental negativo advindo dos fertilizantes químicos, como a poluição do solo e da água.

3.4. Massa seca e carbono

Na Figura 8 são apresentados os resultados estatísticos da massa seca média das plantas de milho para cada tratamento. Percebe-se que não houve diferença estatística entre a massa seca dos tratamentos T2 e T4, que diferem dos demais tratamentos (T1, T3, T5 e o controle T6). Entre os tratamentos T1, T3, T5 e T6 não foi detectada diferença estatística.

Figura 8 – Massa seca média.



T1 - microalgas

T4 - Controle positivo NPK

T2 - microalgas e fertilizantes (K e P)

T5 - Cinzas

T3 - microalgas e cinzas

T6 - Controle negativo, solo

Os tratamentos T2 e T4 apresentaram os maiores valores de massa seca. Esse resultado se deve ao fato de ambos os tratamentos fornecerem a suplementação necessária de N, P e K exigida pela cultura do milho. No tratamento T2, a suplementação de N foi realizada exclusivamente com o biofertilizante de microalgas, resultando em uma massa seca estatisticamente igual à do tratamento T4, onde o N foi fornecido na forma de ureia. Já os tratamentos T1, T3, T5 foram estatisticamente iguais ao tratamento controle T6, isso pode ser explicado pela deficiência de nutrientes, de P em T1 e T3, e de N e P em T5 (Tabela 5), o que dificultou o desenvolvimento do milho.

Apesar de não apresentar diferença estatística entre o tratamento T2 e T4, o T2 é muito mais benéfico para promover uma agricultura mais sustentável. O uso de biofertilizante de microalgas, uma fonte renovável, evita o esgotamento de recursos naturais, ao contrário dos fertilizantes químicos convencionais, diminuindo a pegada ambiental da produção agrícola.

3.4.1. Carbono na massa seca

Os valores de carbono encontrados na massa seca de cada tratamento estão ilustrados na Tabela 6. Observa-se que as variações entre os tratamentos foram pequenas, variando de 85,10% a 91,65%. Os tratamentos T2 e T4 se destacaram com o maior quantitativo de carbono, apresentando 18,60 g e 17,14 g, respectivamente.

Tabela 6 – Teores de carbono presentes na massa seca de cada tratamento. Médias seguidas do desvio padrão

Tratamentos	Porcentagem de carbono (%)	Carbono orgânico (g/g)
T1 - Microalgas	85,10 ± 0,014	10,62 ± 0,45
T2 - Microalgas + suplementação de P e K inorgânico	91,65 ± 0,029	18,60 ± 0,96
T3 - Microalgas + cinzas	84,77 ± 0,036	10,64 ± 0,61
T4 - Controle Positivo (NPK inorgânico)	90,90 ± 0,038	17,14 ± 1,03
T5 - Controle Positivo (Cinzas)	85,37 ± 0,023	10,69 ± 0,31
T6 - Controle negativo (apenas solo)	86,20 ± 0,011	10,45 ± 0,05

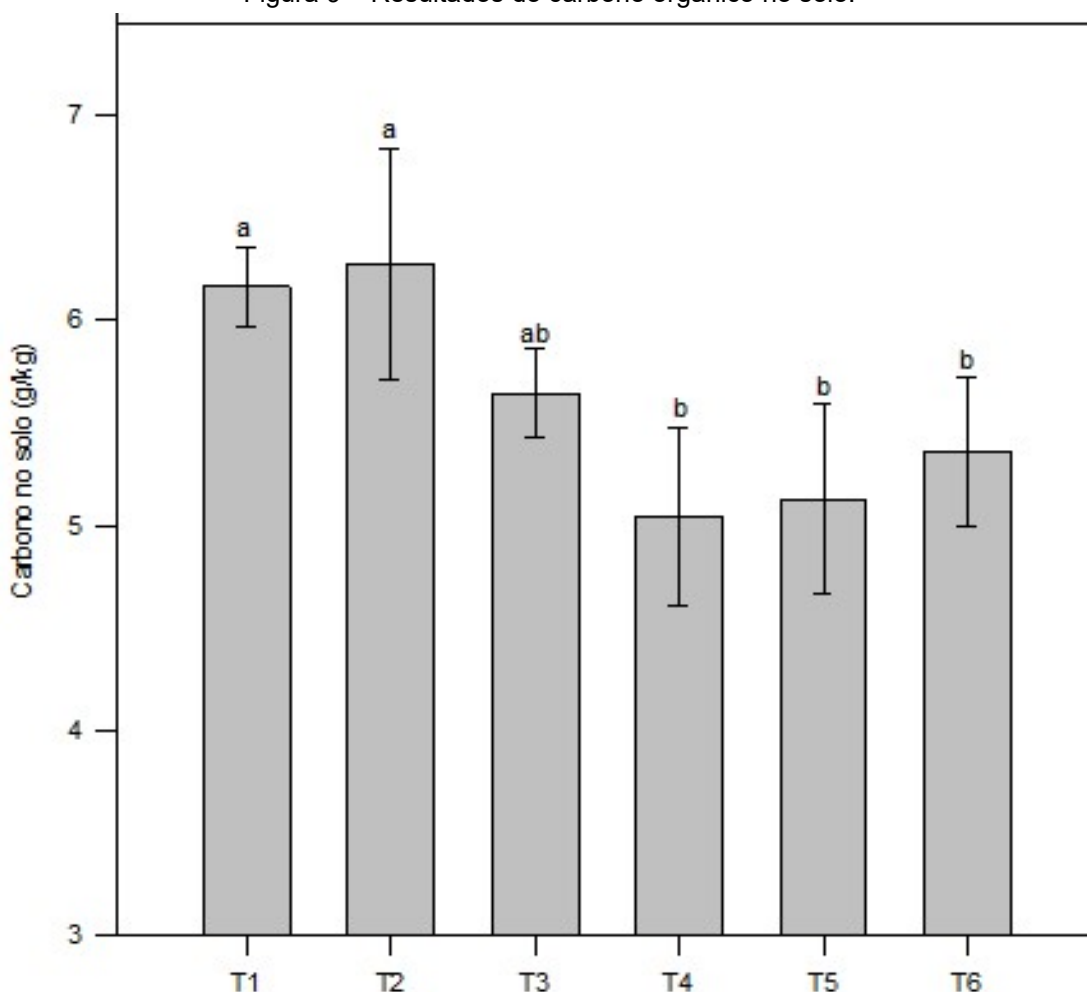
O carbono na massa seca está intimamente ligado ao processo de fotossíntese das plantas, no qual elas capturam o CO₂ do meio e o convertem em energia. A produção de massa seca é influenciada pela eficiência fotossintética. Assim, plantas que realizam esse processo de forma mais eficiente utilizam melhor a radiação solar,

resultando em um aumento na produção de massa seca (VIEIRA et al., 2010). Assim, é de fato esperado que os tratamentos T2 e T4 apresentassem os maiores índices de produção de massa seca (Figura 7), e com maiores teores de carbono na massa seca. Com o exposto, esses tratamentos possibilitaram condições favoráveis para que as plantas se desenvolvam com maior eficiência fotossintética.

3.5. Carbono no solo

Na Figura 9 é possível observar os dados estatísticos referentes à média do carbono orgânico do solo em cada tratamento. Os tratamentos T1 e T2 mostraram-se estatisticamente semelhantes entre si, mas diferem significativamente do tratamento controle (T6). Por outro lado, os tratamentos T4 e T5 são estatisticamente iguais ao tratamento controle T6. O tratamento T3 não apresentou diferenças estatísticas significativas em comparação com os demais tratamentos (T1, T2, T4, T5, T6).

Figura 9 – Resultados do carbono orgânico no solo.



T1 - microalgas	T4 - Controle positivo NPK
T2 - microalgas e fertilizantes (K e P)	T5 - Cinzas
T3 - microalgas e cinzas	T6 - Controle negativo, solo

Os tratamentos nos quais foi adicionado o biofertilizante resultaram nos maiores valores médios de carbono orgânico no solo, sendo eles o T2, T1 e T3, respectivamente. Em comparação ao solo inicial, houve um incremento de carbono, chegando a mais de 1 grama de carbono adicional no T2. Já os tratamentos T4, T5 e T6, apresentaram os menores níveis de carbono, respectivamente. Sendo que o T4 (fertilizantes químicos) e T5 (cinzas) reduziu o teor de carbono em relação ao solo inicial.

Estudos anteriores também destacaram um aumento do estoque de carbono orgânico do solo com a adição de microalgas (RENUKA *et al.*, 2018; SHARMA *et al.*, 2021). Sharma *et al.* (2021) verificaram um aumento no teor de carbono orgânico do solo com a adição de microalgas para atender 100% da necessidade de nitrogênio. Isso demonstra a capacidade das microalgas de devolver o carbono, que foi assimilado na forma de CO₂ (gás de combustão), para o ambiente, imobilizando-o, em sua forma orgânica, no solo.

Outra grande vantagem do biofertilizante é o aumento da atividade microbiana do solo (ALVARENGA *et al.*, 2023; DINESHKUMAR *et al.*, 2019; PEREIRA *et al.*, 2021; SHARMA *et al.*, 2021). Em contraste com a aplicação de fertilizantes químicos, que podem comprometer negativamente a diversidade microbiana do solo, além de causar acidificação e salinização do solo (PEREIRA *et al.*, 2021).

A presença das microalgas também melhora a qualidade do solo ao aumentar a capacidade de troca catiônica (CTC), permitindo a formação de um biofilme de microalgas, que aumenta o teor de matéria orgânica. Além disso, elevam os níveis de macros e micronutrientes disponíveis e aumentam o volume dos poros do solo, melhorando a absorção desses nutrientes (CASTRO *et al.*, 2017; DINESHKUMAR *et al.*, 2019; NAYAK; SWAIN; SEN, 2019; PEREIRA *et al.*, 2021).

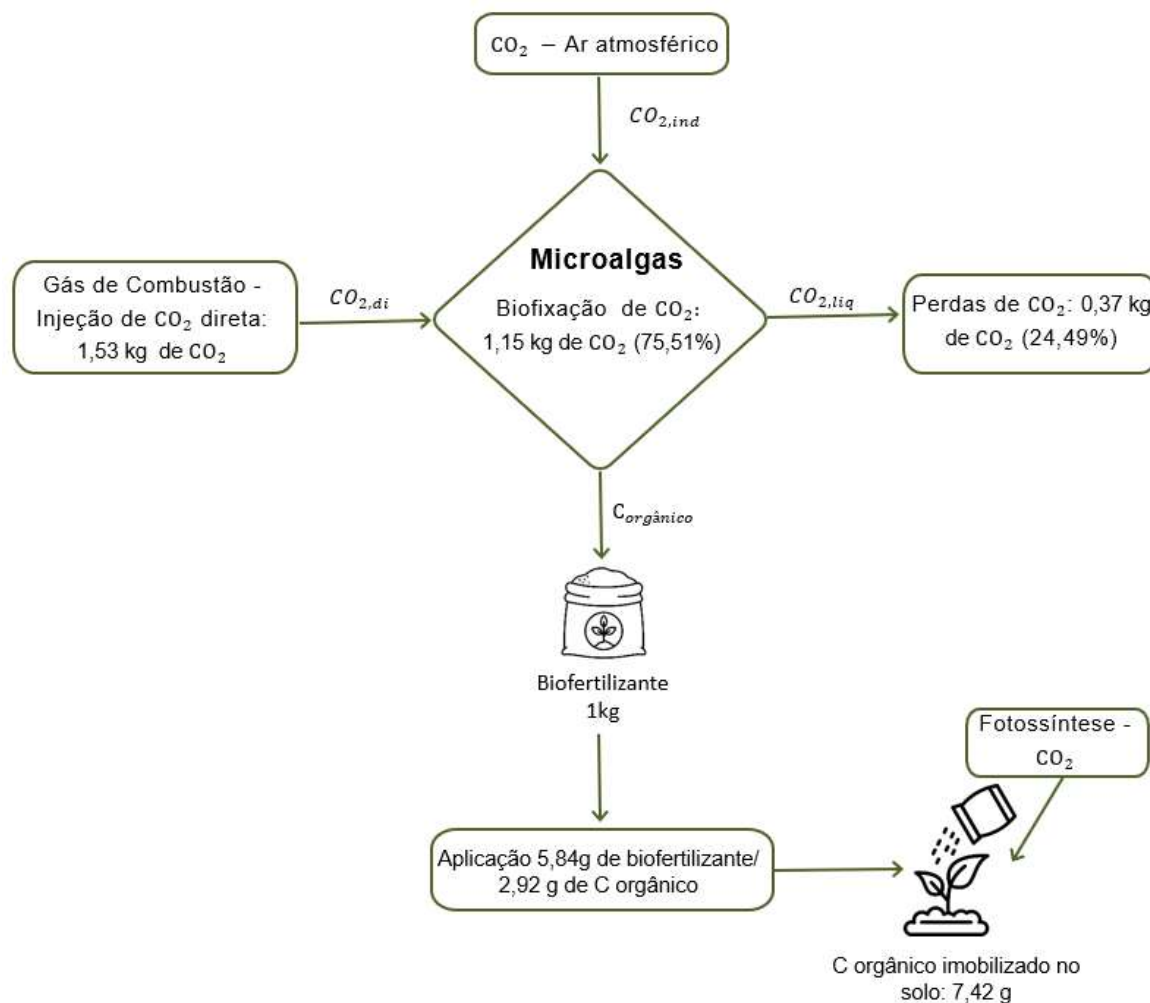
Portanto, o uso de microalgas como biofertilizante junto com fertilizante químico (tratamento T2), também se demonstrou o melhor tratamento para restaurar a fertilidade do solo, contribuindo para a produtividade da cultura. Esse tratamento não apenas aumenta os níveis de carbono orgânico do solo, como também melhora a

atividade microbiana, melhorando a decomposição da matéria orgânica e a ciclagem de nutrientes.

3.6. Alocação do carbono

Na Figura 10 está esquematizado o fluxograma com as entradas e saídas de carbono ao longo do processo de produção de 1 kg de biofertilizante de microalgas e sua aplicação. Essa alocação do carbono ao longo do sistema produtivo foi feita de acordo com tratamento que apresentou os melhores resultados discutidos anteriormente (tratamento T2).

Figura 10 – Alocação do carbono ao longo do processo de produção e aplicação de 1 kg de biofertilizante.



Fonte: A autora.

A entrada do dióxido de carbono no sistema ocorre de forma direta, injeção de gás de combustão, e indireta, gás atmosférico. O gás de combustão possui cerca de

85 g de CO₂, resultando em uma entrada de 595 g de CO₂ por semana. A concentração de CO₂ na atmosfera é cerca de 0,036%. Estudos indicam que, ao injetar um gás de combustão, esse valor pode ser desconsiderado, pois as microalgas não o utilizarão, uma vez que o meio já estará saturado de CO₂ (SINHA *et al.*, 2023).

Esse CO₂ diluído no meio do cultivo é capturado pelas microalgas, que através da fotossíntese convertem CO₂ e luz solar em biomassa, composta por carboidratos, lipídeos, proteínas e rica em carbono orgânico. A taxa de biofixação de CO₂ (R_{CO_2}) foi de 1,783E-03 kg/m³.h, resultando em uma taxa líquida de perdas de CO₂ ($\dot{m}_{CO_2, liq}$) de 1,73E-03 kg/h, sendo 1,15 kg de CO₂ assimilados pela *S. obliquus*, representando 75,51% do total injetado, e 0,37 kg de CO₂ perdidos para o ambiente, correspondendo a 24,49%.

Após o processamento pós-colheita dessa biomassa, a análise de carbono orgânico do biofertilizante revelou um teor de 50% de C. A aplicação de 5,84 g do biofertilizante no solo, por vaso, contribuiu com 417,1 mg de carbono orgânico por litro de solo. Isso levou à imobilização de 1,09 g de C/L de solo, conforme verificado na análise realizada após a colheita do milho. Esse resultado é notável, pois a adição das microalgas elevou os níveis de carbono no solo para além do quantitativo oferecido de 417,1 mg de C/L e do teor inicial do solo.

Outra entrada de carbono, que ocorre no sistema, provém da fotossíntese realizada pelas plantas de milho, as quais assimilam o CO₂ atmosférico e o transformam em energia e biomassa. A análise da massa seca do milho revelou a presença de cerca de 90% de carbono orgânico.

Portanto, conforme demonstrado no fluxograma (Fig. 9), fica evidente o papel eficiente das microalgas nesse sistema. Elas sequestram o CO₂, um gás de efeito estufa, e o convertem em biomassa rica em carbono orgânico. Esta biomassa, ao ser aplicada ao solo na forma de biofertilizante, contribui para a imobilização de carbono, ajudando na mitigação das mudanças climáticas e promovendo práticas agrícolas mais sustentáveis e ecológicas, com a redução da dependência de fertilizantes químicos.

4. CONCLUSÕES

Diante do exposto, conclui-se que as microalgas são uma tecnologia eficiente de sequestro de CO₂, alcançando uma biofixação aparente de 75% do CO₂ injetado no meio, que é convertido em carbono orgânico, representando 50% da biomassa do biofertilizante.

No cultivo do milho, os tratamentos T2 (biofertilizante mais K e P inorgânico) e T4 (NPK inorgânico) se destacaram por produzirem mais massa seca e apresentarem um desenvolvimento superior das plantas. No entanto, o tratamento T2 é o mais sustentável, pois reduz a aplicação de fertilizantes químicos, substituindo a ureia por uma fonte de N orgânico.

Em todos os tratamentos com adição do biofertilizante houve um incremento do teor de carbono no solo, que foi imobilizado, evitando sua emissão para a atmosfera. Portanto, verificou-se que o tratamento T2 foi o melhor, promovendo tanto o desenvolvimento das culturas quanto a sustentabilidade.

REFERÊNCIAS

ABRAHAM, Juliana *et al.* Integrating biological and chemical CO₂ sequestration using green microalgae for bioproducts generation. **Frontiers in Climate** v. 4 , 2023.

AFIFY, Abd El Moneim M.R. *et al.* Scenedesmus obliquus: Antioxidant and antiviral activity of proteins hydrolyzed by three enzymes. **Journal of Genetic Engineering and Biotechnology** v. 16, n. 2, p. 399–408 , 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jgeb.2018.01.002>>.

AJALA, Sheriff Olalekan; ALEXANDER, Matthew L. Assessment of *Chlorella vulgaris*, *Scenedesmus obliquus*, and *Oocystis minuta* for removal of sulfate, nitrate, and phosphate in wastewater. **International Journal of Energy and Environmental Engineering** v. 11, n. 3, p. 311–326 , 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s40095-019-00333-0>>.0123456789.

ALVARENGA, Paula *et al.* Evaluation of the fertilizer potential of *Chlorella vulgaris* and *Scenedesmus obliquus* grown in agricultural drainage water from maize fields. **Science of The Total Environment** v. 861, n. November 2022, p. 160670 , fev. 2023. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969722077737>>.

ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, Ana *et al.* Can microalgae grown in wastewater reduce the use of inorganic fertilizers? **Journal of Environmental Management** v. 323, n. May , 2022.

BRASIL. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA DO ABASTECIMENTO E DA REFORMA AGRÁRIA MAPA. *Instrução Normativa 61/2020* . Brasília, DF: [s.n.] . , 2020

BRAUN, Julia C.A.; COLLA, Luciane M. Use of Microalgae for the Development of Biofertilizers and Biostimulants. **Bioenergy Research** v. 16, n. 1, p. 289–310 , 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s12155-022-10456-8>>.0123456789.

CASTRO, Jackeline de Siqueira *et al.* Microalgae biofilm in soil: Greenhouse gas emissions, ammonia volatilization and plant growth. **Science of the Total Environment** v. 574, p. 1640–1648 , 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.08.205>>.

CHENG, Yoke Wang *et al.* Unravelling CO₂ capture performance of microalgae cultivation and other technologies via comparative carbon balance analysis. **Journal of Environmental Chemical Engineering** v. 9, n. 6, p. 17 , 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106519>>.

DINESHKUMAR, R. *et al.* The Impact of Using Microalgae as Biofertilizer in Maize (*Zea mays* L.). **Waste and Biomass Valorization** v. 10, n. 5, p. 1101–1110 , 2019. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s12649-017-0123-7>>.0123456789.

DO CARMO, D.L.; SILVA, C.A. Quantification methods of carbon and organic matter in organic residues. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo** v. 36, n. 4, p. 1211–1220 , 2012.

FARUQUE, Mohammed Omar; HOSSAIN, Mohammad Mozahar; RAZZAK, Shaikh Abdur. Photoautotrophic Cultivation, Lipid Enhancement, and Dry Biomass Characterization of Microalgae *Scenedesmus dimorphus* for Bioenergy Application. **Arabian Journal for Science and Engineering** v. 48, n. 12, p. 16263–16280 , 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s13369-023-08187-9>>.

FERREIRA, Alice *et al.* *Scenedesmus obliquus* microalga-based biorefinery – from brewery effluent to bioactive compounds, biofuels and biofertilizers – aiming at a circular bioeconomy. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining** v. 13, n. 5, p. 1169–1186 , 2019.

FERREIRA, Magna Maria Macedo. Sintomas de deficiência de macro e micronutrientes de plantas de milho híbrido BRS 10101. **Agro@ambiente** v. v. 6, p. 74–83 , 2012.

GAO, Song *et al.* DISCOVER strain screening pipeline – Part III: Strain evaluation in outdoor raceway ponds. **Algal Research** v. 70, n. April 2022, p. 102990 , 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.algal.2023.102990>>.

GARRIDO-CARDENAS, Jose Antonio *et al.* Microalgae research worldwide. **Algal Research** v. 35, n. August, p. 50–60 , 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.algal.2018.08.005>>.

GATAMANENI LOGANATHAN, Bhalamurugan; ORSAT, Valerie; LEFSRUD, Mark.

Utilizing the microalgal biomass of *Chlorella variabilis* and *Scenedesmus obliquus* produced from the treatment of synthetic dairy wastewater as a biofertilizer. **Journal of Plant Nutrition** v. 44, n. 10, p. 1486–1497 , 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1862191>>.

GHARANJIK, M. A. *et al.* Potential CO₂ biofixation by microalgae strains for industrial application. **International Journal of Environmental Science and Technology** v. 21, n. 11, p. 7479–7490 , 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s13762-024-05562-3>>.0123456789.

GRIFFITHS, Melinda J. *et al.* Interference by pigment in the estimation of microalgal biomass concentration by optical density. **Journal of Microbiological Methods** v. 85, n. 2, p. 119–123 , 2011.

HENRIQUES, Rachel Martins. **Aproveitamento Energético dos RSU: uma abordagem tecnológica.** 2004. 204 p. Disponível em: <<http://www.ppe.ufrj.br/pppe/production/tesis/rachelh.pdf>>.

INTERNATIONAL STANDARD. **Cheese and processed cheese products: determination of fat content - gravimetric method - reference method.** [S.l: s.n.], 1987. p. 7. p. .

ISMAGULOVA, Tatiana *et al.* A new subarctic strain of *Tetrademus obliquus*—part I: identification and fatty acid profiling. **Journal of Applied Phycology** v. 30, n. 5, p. 2737–2750 , 2018.

JOCHUM, Michael; MONCAYO, Luis P.; JO, Young-Ki. Microalgal cultivation for biofertilization in rice plants using a vertical semi-closed airlift photobioreactor. **PLOS ONE** v. 13, n. 9, p. e0203456 , 12 set. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0203456>>.

JULICH, Jennifer *et al.* Estudo da hidrólise enzimática de biomassa de microalga empregando uma sequência de enzimas. **Revista Jovens Pesquisadores** v. 9, n. 2, p. 77–84 , 2019.

LOGANATHAN, Bhalamurugan Gatamaneni; ORSAT, Valerie; LEFSRUD, Mark. Utilizing the microalgal biomass of *Chlorella variabilis* and *Scenedesmus obliquus*

produced from the treatment of synthetic dairy wastewater as a biofertilizer. **Journal of Plant Nutrition** v. 0, n. 0, p. 1–12 , 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1862191>>.

LOURENÇO, Sergio D. **Cultivo de Microalgas Marinhas: Princípios e Aplicações**. Rima Edito ed. São Carlos: [s.n.], 2006. 588 p. 978-85-7656-113-2.

MA, Shanshan *et al.* Application of a microalga, *Scenedesmus obliquus* PF3, for the biological removal of nitric oxide (NO) and carbon dioxide. **Environmental Pollution** v. 252, p. 344–351 , 2019.

MARCOS, Mário Miyazawa *et al.* Análise química de tecido vegetal. In: MARCOS, Mário Miyazawa (Org.). . **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2ª edição ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. p. 193–233. 9788573834307.

MARTINS, MARCIO ARÊDES PEDRUZI, GERSON OVIDIO LUZ; PEREIRA, EMANUELE GRACIOSA; NUNES-NESE, ADRIANO; MENDES, LEONARDO BRANTES BACELLAR; JOAO, Rafael Richard. *Vertical-flow agitation system for microalgae cultivation tanks* . Estados Unidos: [s.n.] . , 2021

MENDONÇA, Eduardo de Sá; MATOS, Eduardo da Silva. **Matéria orgânica do solo: Métodos de análises**. 2ª edição ed. Viçosa: UFV-Gefert, 2017. 221 p. .

NAYAK, Manoranjan; SWAIN, Dillip Kumar; SEN, Ramkrishna. Strategic valorization of de-oiled microalgal biomass waste as biofertilizer for sustainable and improved agriculture of rice (*Oryza sativa* L.)crop. **Science of the Total Environment** v. 682, p. 475–484 , 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.123>>.

OLIVEIRA, Carlos Yure B. *et al.* A multidisciplinary review of *Tetrademus obliquus* : a microalga suitable for large-scale biomass production and emerging environmental applications. **Reviews in Aquaculture** v. 13, n. 3, p. 1594–1618 , 6 jun. 2021. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/raq.12536>>.

PEREIRA, Alexia Saleme Aona de Paula *et al.* Organomineral fertilizers pastilles from microalgae grown in wastewater: Ammonia volatilization and plant growth. **Science of the Total Environment** v. 779 , 2021.

PEREIRA, ALEXIA SALEME AONA DE PAULA. FERTILIZANTE ORGANOMINERAL DE MICROALGAS CULTIVADAS EM ÁGUA RESIDUÁRIA: POTENCIAL AGRÍCOLA E CICLO DE VIDA. v. 3, n. 2, p. 6 , 2021.

REMPEL, Alan *et al.* Microalgae growth using treated domestic effluent added to emerging pollutants: Removal mechanism and generation of by products. **Journal of Water Process Engineering** v. 55, n. March , 2023.

RENUKA, Nirmal *et al.* Microalgae as multi-functional options in modern agriculture: current trends, prospects and challenges. **Biotechnology Advances** v. 36, n. 4, p. 1255–1273 , 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2018.04.004>>.

RIBEIRO, Antonio Carlos; GUIMARÃES, Paulo Tácito G; ALVAREZ V, Victor Hugo. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5ª Aproximação. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5º Aproximação** p. 359 , 1999. Disponível em: <<http://www.labominas.com.br/userfilesfiles/5-aproximacao.pdf>>.

ROCHA, Dilson Novais *et al.* Combination of trace elements and salt stress in different cultivation modes improves the lipid productivity of *Scenedesmus* spp. **Bioresource Technology** v. 289, n. June, p. 121644 , 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121644>>.

ROCHA, DILSON NOVAIS. **RECUPERAÇÃO DE RECURSOS E RACIONALIZAÇÃO DE ENERGIA DO PROCESSAMENTO DE *Scenedesmus obliquus* BR003 PARA PRODUÇÃO DE COMBUSTÍVEIS E ALIMENTOS** Tese. 2023. 356–363 p. 9788527729833.

SHARMA, Gulshan Kumar *et al.* Circular economy fertilization: Phycoremediated algal biomass as biofertilizers for sustainable crop production. **Journal of Environmental Management** v. 287, n. February, p. 112295 , jun. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112295>>.

SINHA, Ankan *et al.* A microalgal biorefinery approach for bioactive molecules, biofuel, and biofertilizer using a novel carbon dioxide-tolerant strain *Tetrademus obliquus* CT02. **Biomass Conversion and Biorefinery** v. 13, n. 14, p. 12605–12618 , 2023.

Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s13399-021-02098-1>>.0123456789.

SOLOVCHENKO, Alexei; KHOZIN-GOLDBERG, Inna. High-CO₂ tolerance in microalgae: Possible mechanisms and implications for biotechnology and bioremediation. **Biotechnology Letters** v. 35, n. 11, p. 1745–1752 , 2013.

TAN, Xiao Bo *et al.* Growth of *Scenedesmus obliquus* in anaerobically digested swine wastewater from different cleaning processes for pollutants removal and biomass production. **Chemosphere** v. 352, n. January, p. 1–10 , 2024.

VALCHEV, Dobril *et al.* Reclamation Potential of Onsite Wastewater Post-Treatment with Microalgae: Chemical Elements Perspective. **Processes** v. 11, n. 6 , 2023.

VENDRUSCOLO, Raquel Guidetti *et al.* Food potential of *Scenedesmus obliquus* biomasses obtained from photosynthetic cultivations associated with carbon dioxide mitigation. **Food Research International** v. 160, n. July , 2022.

ZHOU, Wenguang *et al.* Environment-enhancing algal biofuel production using wastewaters. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** v. 36, p. 256–269 , 2014.

CAPÍTULO II: AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) DO BIOFERTILIZANTE DE MICROALGAS E COMPARAÇÃO DE CENÁRIOS DE SUA APLICAÇÃO NO SOLO

RESUMO

A escassez de recursos naturais e as preocupações com as mudanças climáticas estão impulsionando a busca por soluções sustentáveis. O aumento do CO₂ atmosférico causa danos ecológicos irreversíveis, e a agricultura no Brasil contribui consideravelmente para essas emissões devido ao uso de fertilizantes químicos. O biofertilizante de microalgas surge como uma alternativa promissora para a descarbonização da agricultura, mas é essencial avaliar seus benefícios e impactos ambientais. Este estudo avaliou o potencial ambiental do biofertilizante por meio da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), seguindo as normas ISO 14.040:2009 e 14.044:2009, e utilizando o programa openLCA versão 2.1.0. A análise foi feita para 1 kg de biofertilizante, com o escopo do sistema abrangendo desde o cultivo até a obtenção do produto final, excluindo infraestruturas e equipamentos. O método utilizado foi o *ReCiPe midpoint* (H) 2016, e os dados foram obtidos experimentalmente e do banco de dados Ecoinvent 3.9. Experimentos preliminares mostraram que apenas os tratamentos com microalgas com suplementação de P e K (T2) e NPK inorgânico (T4) forneceram nutrientes necessários, resultando em boa produtividade de massa seca, com base nesses resultados foi feita a ACV comparativa entre T2 e T4. Foram identificadas três categorias principais de impacto: consumo de água, aquecimento global e ecotoxicidade terrestre. A eletricidade usada na produção foi a principal fonte de impactos, representando 80% no consumo de água e 60% no aquecimento global. A ACV comparativa revelou que o tratamento T2 apresentou impactos ambientais menores que T4 em todas as categorias, com a maioria dos impactos negativos, indicando benefícios ambientais. O tratamento T4, por sua vez, teve impactos positivos em todas as categorias, especialmente em ecotoxicidade terrestre e eutrofização, associados ao uso de fertilizantes químicos. O biofertilizante T2 aumentou a retenção de carbono no solo, enquanto T4 resultou em esgotamento de carbono do solo. Assim, a ACV confirmou que o T2 é mais sustentável, substituindo eficazmente a ureia como uma fonte nitrogenada.

Palavras-chave: Impactos ambientais. Energia. Carbono.

1. INTRODUÇÃO

A escassez de recursos naturais e as preocupações com as mudanças climáticas têm impulsionado a busca por soluções sustentáveis e inovadoras. O aumento contínuo nos níveis dos gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera tem causado danos irreversíveis ao ecossistema, exigindo a adoção de tecnologias verdes que ajudem na mitigação de CO₂ e produzir tecnologias com menor impacto ambiental (YADAV; DUBEY; SEN, 2020).

De acordo com o relatório do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG), o setor agropecuário foi responsável por 27% das emissões anuais de gases de efeito estufa no Brasil em 2022 (TSAI *et al.*, 2023). Na agricultura, especificamente, esse impacto é predominantemente atribuído ao uso intensivo de fertilizantes químicos, em especial os fertilizantes nitrogenados sintéticos, que representam a principal fonte de emissões dentro desse setor. Um fator adicional e preocupante é a dependência desses fertilizantes de recursos não renováveis, como o fósforo (P), cuja aplicação em larga escala na agricultura, aliada a taxas de extração superiores à regeneração das reservas, resultam em um uso não sustentável desse recurso essencial (CASTRO *et al.*, 2020).

O SEEG também destaca que a intensidade de carbono da economia brasileira não apresenta uma tendência de queda, o que seria desejável para um país comprometido com a descarbonização (TSAI *et al.*, 2023). Neste contexto, o uso de biofertilizantes à base de microalgas emergem como uma alternativa promissora para reduzir a pegada de carbono da agricultura. Além de fornecer nutrientes essenciais, como nitrogênio, fósforo e potássio, esses biofertilizantes oferecem macro e micronutrientes que melhoram a qualidade do solo e reduzem a dependência de fertilizantes sintéticos (PEREIRA, 2021; SHARMA *et al.*, 2021). O cultivo de microalgas também oferece a vantagem ambiental significativa de capturar CO₂ durante o seu cultivo.

Para quantificar e avaliar os benefícios ambientais e possíveis impactos negativos da produção de biofertilizantes de microalgas, a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) se apresenta como uma ferramenta crucial. A ACV permite avaliar todas as entradas e saídas ao longo do ciclo de vida do produto, facilitando comparações entre diferentes opções tecnológicas e é regida pelas Normas

internacionais ISO 14.040:2009 e 14.044:2009 (HAUSCHILD; ROSENBAUM; OLSEN, 2018).

Apesar da literatura já explorar amplamente as microalgas em contextos como a produção de biodiesel, alimentos e nutracêuticos, há uma lacuna considerável em estudos focados na produção de biofertilizantes, especialmente em escala piloto. Assim, este capítulo explorou a viabilidade ambiental da produção de biofertilizantes de microalgas em escala piloto por meio da ACV. Este estudo buscou preencher a lacuna existente na literatura, fornecendo uma análise detalhada dos impactos ambientais e propondo soluções para mitigá-los.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Avaliação de Ciclo de vida

A avaliação do ciclo de vida (ACV) foi realizada seguindo as normas da International Organization for Standardization, ISO 14.040:2009 e 14.044:2009 que estabelecem os princípios da análise de ciclo de vida, abordagem relativa, foco ambiental e unidade funcional (ISO, 2009a; ISO, 2009b). De acordo com as normas, a ACV é estruturada em quatro etapas básicas, definição do objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impacto e interpretação dos resultados (HAUSCHILD; ROSENBAUM; OLSEN, 2018).

As análises foram realizadas utilizando o programa *Open LCA*, versão 2.1.0 (GreenDelta, Alemanha). As subseções a seguir detalham o conteúdo específico de cada fase.

2.2. Definição do objetivo, unidade funcional e escopo da avaliação do ciclo de vida

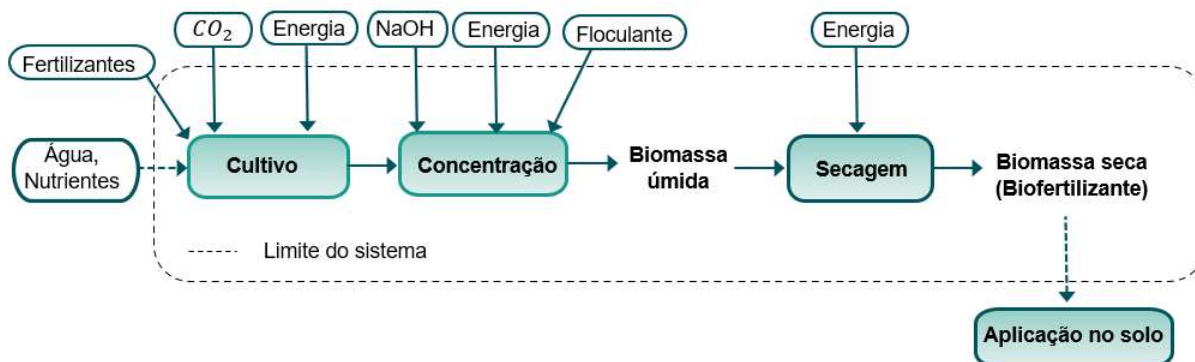
O objetivo deste estudo foi definir, analisar e comparar os impactos ambientais referentes à produção de biofertilizantes a partir da microalga *Scenedesmus obliquus* BR003, além de identificar pontos críticos e propor soluções para otimizar o sistema, melhorando seu desempenho ambiental e energético. A unidade funcional, adotada para o estudo, foi de 1 kg de biofertilizante.

No escopo deste trabalho foram consideradas cada etapa da cadeia de produção do biofertilizante de *S. obliquus*. O limite do sistema foi “do berço ao portão” (*cradle-to-gate*), compreendendo os processos de cultivo, colheita e a fase de processamento até a obtenção do produto final, o biofertilizante (Figura 11). Foram estudadas todas as entradas e saídas de materiais e recursos energéticos (calor e eletricidade). Também foram quantificadas as emissões GEEs e os demais impactos ambientais da produção quanto ao uso dos recursos, a fim de entender o desempenho ambiental. Outro fator que foi avaliado é a pegada hídrica para determinar o consumo de água.

No entanto, a vida útil das infraestruturas e equipamentos foi negligenciado, uma vez que o seu impacto seria insignificante em comparação com o impacto global.

Neste trabalho, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) foi do tipo atribucional, pois envolveu a alocação de coprodutos e utilizou dados médios do Inventário de Ciclo de Vida (ICV) em um sistema considerado de fronteira estática e definida.

Figura 11 – Limites e diagrama de fluxo do sistema do estudo.



Fonte: A autora.

2.3. Elaboração do inventário do ciclo de vida dos sistemas de produtos

O inventário foi elaborado com base nos dados reais coletados experimentalmente de todas as entradas e saídas do sistema, complementados por informações do banco de dados Ecoinvent 3.9, que inclui eletricidade, água e fertilizantes. Para os dados de energia elétrica consumida, foi utilizada a matriz energética brasileira, que possui uma participação significativa de energias renováveis, representando 87,9% em 2022 (EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2022).

A fim de investigar a influência da matriz energética nos resultados, foi feita uma simulação com a substituição da matriz energética brasileira pela holandesa, composta predominantemente por combustíveis fósseis conforme Castro et al. (2020).

Todos os fluxos de energia foram considerados, conforme representado no limite do sistema (Figura 11). Também foi considerada a pegada hídrica, avaliando as entradas e saídas de água.

A cadeia produtiva foi subdividida em etapas para realizar a análise do “berço ao portão” de forma bem detalhada. Após o levantamento das informações, estas foram organizadas em uma tabela.

2.4. Realização da avaliação de impactos de ciclo de vida

As categorias de impacto ambiental avaliadas que foram selecionadas entre as disponibilizadas pelo programa e incluem: aquecimento global, consumo de água, escassez de recursos fósseis, eutrofização de água doce, acidificação terrestre, ecotoxicidade terrestre, destruição da camada de ozônio, depleção de água e formação de material particulado. Essas categorias foram consideradas apropriadas para o estudo, de acordo com pesquisas anteriores (ARASHIRO *et al.*, 2022; CASTRO *et al.*, 2020b; SOUZA *et al.*, 2019).

Utilizando o programa *open LCA* foi realizada a Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida (AICV), permitindo a quantificação e avaliação das categorias de impacto do ciclo de vida, bem como a mensuração das incertezas dos dados. O método de AICV empregado foi o *ReCiPe midpoint* (H) 2016. Este método não apenas fornece métricas de desempenho ambiental para a ACV, mas também caracteriza o sistema de produção definido neste estudo. A partir dos resultados, foi possível apresentar graficamente e por meio de tabelas os desempenhos nas diferentes categorias de impacto propostas, além de comparar o desempenho do produto em cada categoria investigada por meio da normalização dos resultados.

2.5. Comparação de cenários

Experimentos preliminares foram conduzidos utilizando a cultura do milho (*Zea mays*) para avaliar os efeitos do biofertilizante. Os ensaios foram realizados em vasos de 7 litros, em um delineamento inteiramente casualizado com 6 tratamentos e 5 repetições. Os tratamentos incluíram: Microalgas (T1), Microalgas com suplementação de P e K inorgânico (T2), Microalgas e cinzas (T3), Controle Positivo com NPK inorgânico (T4), Controle Positivo com Cinzas (T5) e Controle negativo apenas com solo (T6). As fontes de N foram microalgas e ureia, nos tratamentos T2 e T4, respectivamente, e de P e K foram superfosfato simples (SS) e Cloreto de Potássio (KCl).

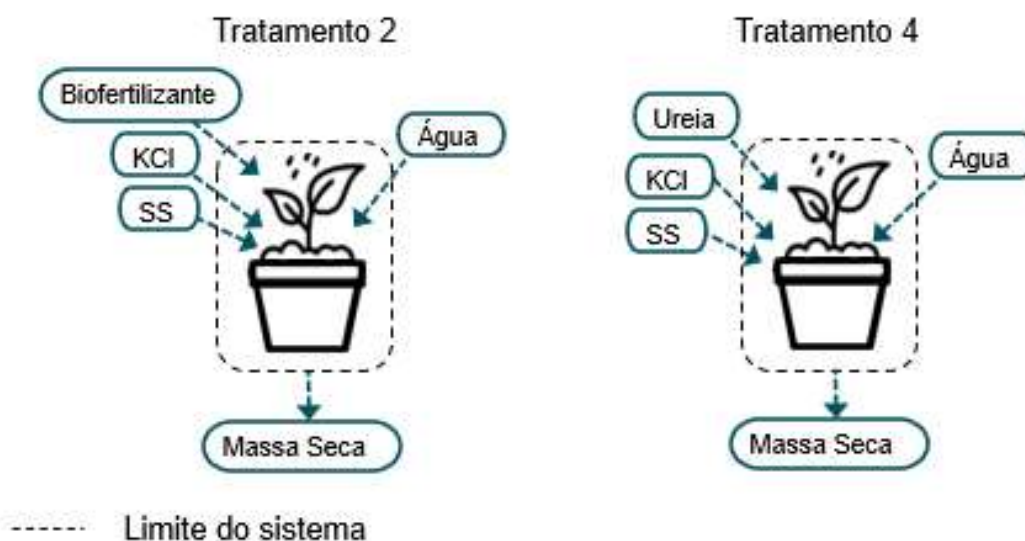
Os tratamentos foram monitorados diariamente quanto à necessidade hídrica, com irrigação manual, além do controle de pragas, ervas daninhas e acompanhamento do crescimento das plantas. Ao final de 49 dias de experimentos, observou-se que apenas os tratamentos T2 (Microalgas com suplementação de P e

K) e T4 (Controle Positivo com NPK inorgânico), forneceram nutrientes suficientes para o desenvolvimento adequado das plantas, resultando em uma boa produtividade de massa seca. Os demais tratamentos sofreram com deficiências nutricionais, refletidas em baixas produtividades.

Com base nesses resultados, foi realizada uma ACV comparativa entre os tratamentos T2 e T4, visando avaliar os impactos ambientais. Os demais tratamentos (T1, T3, T5 e T6) não foram incluídos nesta análise devido à ineficiência observada no desenvolvimento das plantas.

A unidade funcional adotada foi de 100 g de massa seca, e o limite do sistema está apresentado na Figura 12, considerando cada vaso com a planta como um volume de controle. As entradas e saídas de cada tratamento foram organizadas em um inventário de ciclo de vida. Para a análise, também se utilizou o programa *OpenLCA* e o método de avaliação *ReCiPe midpoint (H) 2016*, abrangendo as mesmas categorias de impactos avaliadas para a produção do biofertilizante.

Figura 12 – Limites do sistema para os tratamentos T2 e T4.



Fonte: A autora.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Inventário do ciclo de vida produção do Biofertilizante

Os valores que correspondem às entradas e saídas utilizadas no *programa Open LCA* para a análise dos impactos ambientais do sistema, para compor o Inventário de ciclo de vida da produção de 1 kg de biofertilizante, estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Inventário do ciclo de vida da produção do biofertilizante

Utilitários/Materiais	Entrada/Saída	Ud	Ud/ kg de biomassa
Entradas			
Produção de microalgas			
1. Cultivo		Entradas	
CO ₂		kg	1,526
Fornecimento de fertilizantes		Entrada	
Ureia		kg	2,179
MAP		kg	0,282
KCl		kg	1,805
MgSO ₄		kg	0,472
FeSO ₄		kg	0,164
Água da rede pública (potável)		L	107,6
2. Colheita		Entrada	
Floculante		kg	0,051
Água		m ³	102,6
Hidróxido de sódio (NaOH)		kg	1,538
3. Produção do Biofertilizante		Entrada	
Biomassa Seca		kg	1
		Saída	
Biofertilizante		kg	1
4. Energia		Entrada	
Agitação do cultivo de microalgas no tanque (Fotovoltaica)		kWh	2,706

Utilitários/Materiais	Entrada/Saída	Ud	Ud/ kg de biomassa
Compressão do gás carbônico		kWh	1,082
Bombeamento		kWh	0,474
Secagem		kWh	92,31
5. Balanço de CO₂			
	Entrada		
Fornecimento de CO ₂		kg	1,526
	Saída		
Perdas de CO ₂		kg	0,374
6. Pegada Hídrica			
	Entrada		
Água		kg	102,6
	Saída		
Perdas			
Evaporação		kg	7,20

Fonte: A autora.

Todos os dados utilizados para o Inventário (Tabela 7) são primários, oriundos dos experimentos. De acordo com Souza *et al.*, 2019, a utilização de dados primários em análises é extremamente relevante, especialmente no contexto brasileiro, devido à escassez de informações relacionadas a sistemas desse tipo.

Os valores apresentados na Tabela 7 correspondem as entradas e saídas utilizadas no *programa Open LCA* para a análise dos impactos ambientais do sistema. O consumo energético foi dividido em etapas. Na etapa de agitação das microalgas no tanque de cultivo foi utilizado o sistema de agitação por placa de mistura (MARTINS, *et al.*, 2021, Patent No. US20210345570A1). Como o consumo de energia desse sistema é baixo, foi utilizada energia solar fotovoltaica, enquanto nas demais etapas foi utilizada energia elétrica da rede de abastecimento local.

Entre todas as etapas, a secagem apresentou o maior consumo energético, com um total de 92,31 kWh. Esse resultado é consistente com Hossain, Zaini, Indra Mahlia, (2019), que também identificaram a secagem como a etapa mais intensiva em energia em um processo semelhante. Por outro lado, o bombeamento apresentou o menor consumo energético, com apenas 0,474 kWh. Esse baixo consumo foi devido à menor potência do equipamento e ao tempo reduzido de operação, que durou poucos minutos, em contraste com a secagem, que demandou várias horas para sua conclusão.

A análise da pegada hídrica, foi segmentada em dois principais componentes: as perdas por evaporação, correspondente a 7,2 kg de água, e o volume de água necessário para reposição no tanque a cada ciclo de cultivo, de 102,6 kg. Após a colheita da biomassa, a água é recirculada de volta ao tanque, minimizando o consumo adicional. No entanto, as perdas acumuladas ao longo do processo precisam ser corrigidas para assegurar que o nível de água no tanque permaneça, assegurando condições ideais para o próximo ciclo de cultivo. É importante destacar que a avaliação da pegada hídrica representa um desafio, devido à sua forte dependência das condições climáticas locais, como temperatura, velocidade do vento e radiação solar conforme apontado por Chisti (2016). Hossain, Zaini, Indra Mahlia (2019) também ressaltaram que incertezas associadas ao consumo e aos fluxos de água representam obstáculos para uma análise precisa, destacando a importância de um monitoramento mais detalhado e eficiente desse recurso.

Os quantitativos de fertilizantes utilizados para a produção de 1 kg de biofertilizante também estão descritos, incluindo ureia, MAP, KCl, MgSO₄ e FeSO₄, além de outros insumos, como o floculante e o hidróxido de sódio. Esses insumos já estavam disponíveis no local do experimento, não sendo considerado o transporte destes nos cálculos. Os fertilizantes foram definidos com base na pesquisa de Rocha *et al.*, (2019), que comprovou o bom desempenho da linhagem *S. obliquus* BR003. Essa abordagem permitiu uma redução na quantidade de fertilizantes aplicados em comparação com outros trabalhos, como os de Yadav, Dubey e Sen (2020) e Gaber, Rösch, Biondi (2022).

No que diz respeito ao CO₂, considerou-se uma entrada de 1,526 kg de CO₂, proveniente de gás de combustão gerado localmente, e uma saída de 0,374 kg de CO₂, correspondente às perdas não assimiladas pelas microalgas durante o cultivo. O gás de combustão foi fornecido por meio de um compressor, cujo consumo energético foi contabilizado no inventário. Essa abordagem garante uma análise detalhada do balanço de carbono no sistema avaliado.

3.2. Impactos ambientais da produção do Biofertilizante

Os resultados da ACV obtidos pelo programa *open LCA* utilizando a metodologia *ReciPe midpoint (H) 2016*, estão apresentados na Tabela 8, que permite a avaliação das categorias de impacto selecionadas.

Tabela 8 – Resultados da Avaliação do ciclo de vida da produção do Biofertilizante

Categoria de Impacto	Unidade	Resultados
Formação de material particulado	kg PM _{2,5} eq	0,036
Escassez de recursos fósseis	kg oil eq	5,536
Eutrofização de água doce	kg P eq	0,003
Aquecimento Global	kg CO ₂ eq	21,28
Destruição da camada de ozônio	kg CFC11 eq	3,76×10 ⁻⁵
Acidificação terrestre	kg SO ₂ eq	0,054
Ecotoxicidade terrestre	kg 1,4-DCB	75,72
Consumo de água	m ³	247,58
Depleção da água	m ³	0,191

kg PM_{2,5} eq - equivalência em partículas finas com diâmetro cerca de 2,5 micrômetros; kg oil eq - quilogramas equivalentes de petróleo; kg P eq – quilogramas equivalentes de fósforo; kg CO₂ eq - emissões de gases de efeito estufa em quilogramas equivalentes de dióxido de carbono; kg CFC11 eq - quilogramas equivalentes de clorofluorcarbono 11; kg SO₂ eq – quilogramas equivalentes de dióxido de enxofre; kg 1,4-DCB eq – quilogramas equivalentes de 1,4-diclorobenzeno.

Os dados apresentados na Tabela 8 correspondem aos valores totais de cada impacto ambiental associado à produção de 1 kg de Biofertilizante. Quando comparados aos resultados de Prado et al. (2023), foi observado que as categorias mudanças climáticas (3,85 kg CO₂ eq), formação de material particulado (0,0052 kg PM_{2,5} eq) e ecotoxicidade terrestre (5,83 kg 1,4-DCB) apresentaram valores inferiores neste estudo. Enquanto as categorias acidificação terrestre (0,013 kg SO₂ eq), eutrofização de água doce (0,0047 kg P eq) e destruição da camada de ozônio (1.19x10⁻⁵) mostraram resultados próximos. Essas diferenças podem ser atribuídas às condições experimentais distintas, como por exemplo, embora ambos os estudos tenham sido realizados em escala piloto, o tanque utilizado por Prado et al. (2023) tinha capacidade de 216 litros, cerca de 18 vezes menor do que o tanque empregado no presente trabalho.

Para uma análise comparativa justa, os resultados da Tabela 8 foram normalizados. Essa abordagem permitiu constatar que as categorias destruição da camada de ozônio, formação de material particulado e acidificação terrestre apresentaram impactos relativamente baixos em relação às demais categorias. Por outro lado, consumo de água e ecotoxicidade terrestre se destacaram como aquelas de maior impacto.

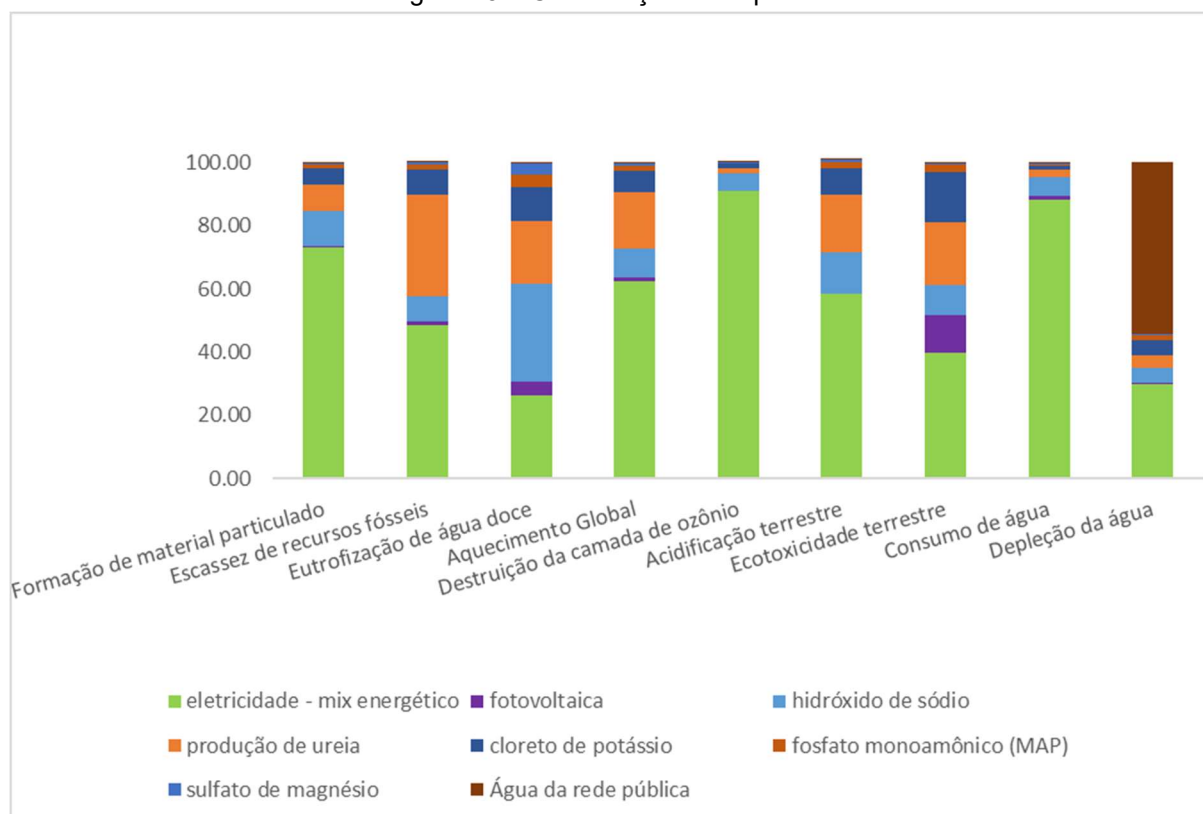
As condições experimentais reais deste estudo, que envolveram o cultivo em tanque aberto do tipo *mixing board* (agitação por placa de mistura), resultaram em uma baixa produção semanal de biomassa (160 mg/L). Essa limitação de

produtividade teve um impacto relevante no consumo de insumos necessários para gerar a quantidade final de 1 kg de biofertilizante, especialmente no que diz respeito ao consumo de energia elétrica, aumentando, conseqüentemente, os impactos ambientais relacionados. Esses resultados corroboram os achados de Yadav, Dubey, Sen (2020), que demonstraram que o aumento da produtividade no cultivo pode reduzir o consumo de energia elétrica em até 78%, evidenciando o papel crucial da eficiência produtiva na mitigação dos impactos ambientais.

Nas últimas décadas, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) tem sido amplamente empregada para investigar as implicações ambientais da produção e utilização de microalgas. Contudo, a heterogeneidade nas delimitações dos limites do sistema, premissas adotadas e especificações dos métodos de AICV, colocam obstáculos à comparação direta entre os estudos sem uma análise muito minuciosa. No contexto deste estudo, a originalidade está no uso de dados operacionais reais de uma planta piloto para avaliar os impactos ambientais da produção de biomassa da microalga *Scenedesmus obliquus*. Foram utilizados esses dados para realizar uma análise abrangente, levando em conta todas as etapas do ciclo produtivo do biofertilizante.

A Figura 13 ilustra as contribuições de cada etapa do processo (Tabela 8) em todas as categorias de impacto avaliadas.

Figura 13 – Contribuição de Impactos.



Fonte: A autora.

Como esperado, a energia elétrica foi a responsável pela maior porcentagem de contribuição na maioria dos processos, com exceção das categorias eutrofização de água doce e depleção de água. Isso vai de acordo com estudos da literatura, onde a energia elétrica também foi apontado como o principal contribuinte de impactos ambientais na produção de microalgas (ARASHIRO *et al.*, 2022; CASTRO *et al.*, 2020; DE SOUZA *et al.*, 2019; GABER; RÖSCH; BIONDI, 2022; PRADO *et al.*, 2023).

Em 2022, 61,9% do total de energia elétrica ofertada no Brasil foi proveniente das hidrelétricas, sendo que a participação de renováveis na matriz elétrica brasileira correspondeu a 87,9% (EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2022). Esse perfil energético foi o principal responsável pelo grande impacto no consumo de água da produção do biofertilizante.

3.2.1. Consumo e Depleção de água

Na categoria consumo de água, constatou-se que 88% do impacto total é atribuído ao consumo de energia elétrica. Esse resultado reflete a predominância de hidrelétricas na matriz energética brasileira que influencia diretamente o consumo de água. A simulação com a substituição da matriz energética brasileira pela holandesa, no *OpenLCA*, indicou uma redução substancial do impacto no consumo de água, equivalente a 5,53 vezes menor (44,76 m³).

Para a categoria depleção de água, o processo água da rede pública (potável), que se refere à água da rede de abastecimento utilizada para repor as perdas do processo, foi o maior contribuinte, representando 54% do impacto total. Este resultado é esperado, pois essa água, ao ser incorporada ao sistema de cultivo das microalgas, deixa de estar disponível para consumo humano e outras atividades, passando a integrar o ciclo do sistema de cultivo.

A energia elétrica contribuiu com cerca de 29% para a categoria depleção de água. Esse resultado é particularmente relevante quando comparado ao seu impacto no que diz respeito ao consumo de água, em que a energia elétrica representa 80%. Esse contraste demonstra que, apesar de a energia elétrica estar associada a um alto consumo de água, sua influência sobre a depleção de água é consideravelmente menor. A depleção de água se caracteriza como um impacto ambiental causado pela

diminuição dos recursos hídricos disponíveis, enquanto o consumo de água mede apenas a quantidade de água utilizada no processo. Dessa forma, por mais que a geração de energia elétrica utilize uma grande quantidade de água, isso não significa necessariamente uma diminuição da disponibilidade de recursos hídricos.

3.2.2. Aquecimento Global

A análise detalhada da Figura 13 indica que mais de 60% das emissões de GEE, que contribuem significativamente para o aquecimento global, são provenientes do consumo de energia elétrica dentro do sistema. Em seguida, a produção de ureia, NaOH e KCl são responsáveis por aproximadamente 18, 9 e 6% das emissões, respectivamente. A energia solar fotovoltaica contribuiu com apenas cerca de 1% para a categoria aquecimento global, destacando-se como uma alternativa energética promissora para ser implantada em outras etapas do processo produtivo, como na secagem, que apresenta um elevado consumo energético.

Além da energia solar fotovoltaica, alternativas de uso de energia solar térmica também pode ser utilizada como fonte de energia para a secagem. No estudo de Souza *et al.* (2019), a substituição da energia elétrica por energia fotovoltaica resultou em uma redução significativa da maioria dos impactos ambientais, alcançando até 73,07% de redução na categoria de mudanças climáticas.

No cenário com a substituição da matriz energética pela holandesa, houve um aumento do impacto de aquecimento global, o que reflete a característica da matriz holandesa que tem maior contribuição de fontes de energias não renováveis, que contribuem mais com emissões de GEE. Para essa categoria, a matriz holandesa teve mais que o dobro de impacto, 54,77 kg de CO₂ equivalente (eq.).

3.2.3. Eutrofização de água doce, ecotoxicidade terrestre e acidificação terrestre

Na categoria eutrofização de água doce, o hidróxido de sódio foi o responsável pela maior porcentagem de contribuição do impacto, com cerca de 31%, seguida pela energia elétrica (26%), produção da ureia (20%) e cloreto de potássio (10%). A eutrofização de corpos hídricos está relacionada ao enriquecimento de nutrientes em água, sendo o principal caminho para a eutrofização aquática através da difusão de

nitratos (N) e fosfatos (P) de fontes terrestres (SARANYA; RAMACHANDRA, 2020). O que é refletido pelos resultados das contribuições encontradas.

A produção de energia elétrica também foi a principal responsável pelas categorias de impactos ecotoxicidade e acidificação terrestre, com cerca de 58% e 40%, respectivamente. Para ambas categorias de impacto, houve contribuições consideráveis dos fertilizantes adicionados, principalmente a ureia com 19 e 18%, respectivamente, o potencial de acidificação ($\text{kg SO}_2 \text{ eq}$), está diretamente relacionado a emissões causadas pelo uso de fertilizantes (SARANYA; RAMACHANDRA, 2020).

Em relação a ecotoxicidade, um ponto relevante é a contribuição da energia solar fotovoltaica, com cerca de 12%. Esse impacto pode ser atribuído à produção dos painéis fotovoltaicos, que envolve extração de metais que podem liberar substâncias tóxicas no solo.

Para as categorias Eutrofização de água doce e Acidificação terrestre, a substituição pela matriz energética holandesa resultou em um aumento dos impactos ambientais, com um incremento de 4 vezes na eutrofização e 1,3 vezes na acidificação. No entanto, a categoria ecotoxicidade terrestre apresentou uma redução de 20%.

3.2.4. Escassez de Recursos fósseis

Na categoria escassez de recursos fósseis as contribuições foram de 48% para a produção de energia elétrica, seguida pela ureia que foi responsável por cerca 32%. Embora a matriz energética brasileira seja predominantemente renovável, a parcela de fontes fósseis reflete esse resultado. A ureia, por sua vez, depende fortemente de recursos fósseis para sua produção, o que justifica sua contribuição significativa.

A simulação com a matriz holandesa, conhecida por sua dependência de combustíveis fósseis, resultou em um aumento de 30% no impacto relacionado à escassez de recursos fósseis, conforme já esperado.

3.2.5. Formação de material particulado e destruição da camada de ozônio

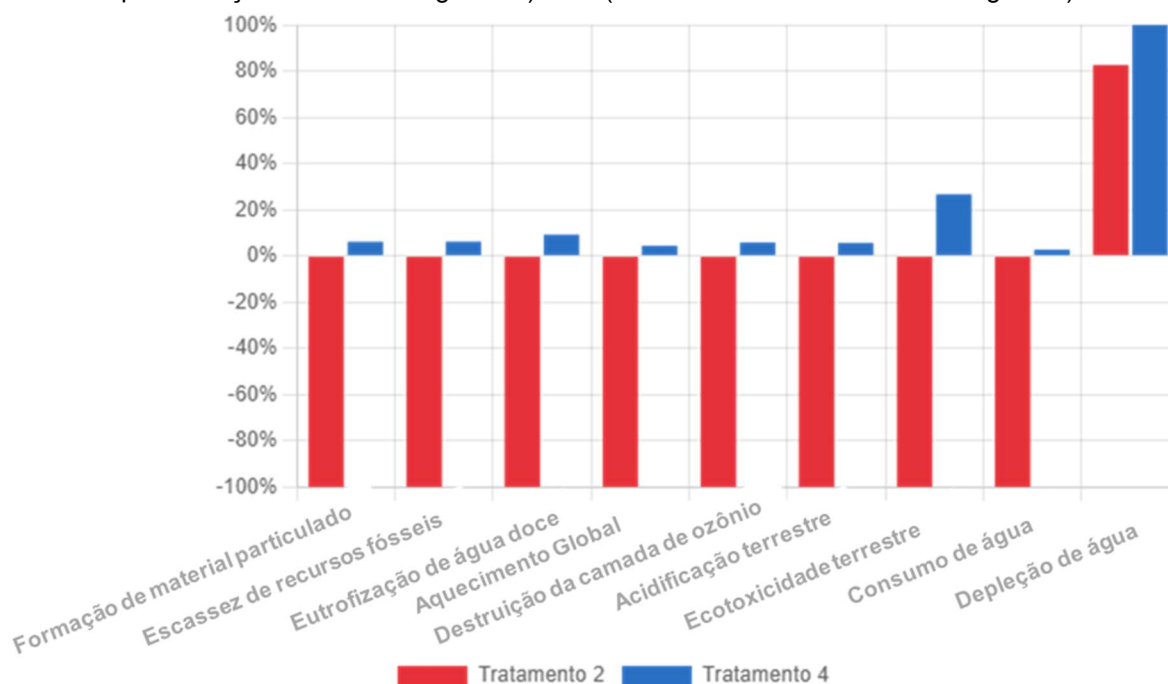
Para os impactos formação de material particulado e destruição da camada de ozônio, a energia elétrica também foi a maior contribuinte com cerca de 73 e 91%, respectivamente. Conforme indicado na Tabela 8, ambos os impactos foram relativamente pequenos. O cenário com energia holandesa resultou em impactos ligeiramente menores, embora as diferenças sejam pequenas devido à similaridade nas magnitudes.

O estudo de Castro *et al.* (2020) indicou que, ao substituir a matriz energética brasileira pela matriz holandesa, houve um aumento nos impactos em 6 das 7 categorias avaliadas, a única exceção foi a categoria mudanças climáticas, onde os impactos foram 12% maiores para a matriz brasileira. No presente estudo, das 9 categorias analisadas, 3 apresentaram menores impactos com a matriz holandesa: consumo de água, formação de material particulado e destruição da camada de ozônio, conforme já discutido. Para a categoria aquecimento global, a matriz holandesa gerou um impacto duas vezes maior, contrastando com os resultados obtidos por Castro *et al.* (2020).

3.3. Comparação entre os Tratamentos

A Figura 14 apresenta a comparação dos impactos ambientais, expressa em porcentagem relativa, entre os dois tratamentos que se destacaram por sua eficiência na produtividade e no desenvolvimento das plantas: o tratamento Microalgas com suplementação de P e K inorgânicos (T2) e Controle Positivo com NPK inorgânico (T4).

Figura 14 – Comparação percentual dos impactos dos tratamentos T2 (Microalgas com suplementação de P e K inorgânicos) e T4 (Controle Positivo com NPK inorgânico)



Pela Figura 14, observa-se que o tratamento com o biofertilizante de microalgas com suplementação de P e K inorgânico (T2) resultou em impactos ambientais significativamente menores em quase todas as categorias investigadas, com valores negativos, indicando uma contribuição positiva para o meio ambiente. De forma semelhante, o estudo de Souza *et al.*, (2019) constatou que a aplicação de biofertilizante no solo resultou em menores impactos ambientais, incluindo valores negativos na categoria de aquecimento global.

A única exceção observada no presente estudo foi na categoria de depleção de água, onde o impacto do tratamento T2, embora positivo, foi menor em comparação ao tratamento com uso de NPK inorgânico (T4).

Por outro lado, o tratamento onde se utilizou NPK inorgânico (T4) apresentou impactos positivos em todas as categorias, refletindo maior dano ambiental. Apenas na categoria depleção de água o desempenho de T4 foi próximo de T2, sendo que essa categoria foi a de maior impacto em ambos os tratamentos. Esse impacto pode ser atribuído ao fato de que a água utilizada no desenvolvimento das plantas se torna indisponível para outros usos, não retornando aos corpos hídricos da mesma forma. A categoria de consumo de água, no entanto, não foi tão significativa, com T4 apresentando um consumo modesto e T2 exibindo um impacto abaixo de zero.

A categoria de ecotoxicidade terrestre foi a segunda de maior impacto para o tratamento T4 seguida pela categoria eutrofização da água, o que pode ser associado ao uso de fertilizantes químicos em ambas.

O uso do biofertilizante em T2 favoreceu a retenção de carbono no solo, com um teor de carbono orgânico imobilizado em solo superior ao quantitativo inicial, o que foi fundamental para o resultado de mitigação de emissões de CO₂ e incremento da qualidade do solo. Em contraste, em T4 a imobilização de carbono foi negativa, indicando um possível esgotamento de carbono no solo devido ao uso de fertilizantes químicos. Esses resultados confirmam a relevância da adição do biofertilizante como forma de aumentar a retenção de carbono, o que é essencial para melhorar a atividade microbiana do solo e o teor de matéria orgânica (ALVARENGA *et al.*, 2023; CASTRO *et al.*, 2017; DINESHKUMAR *et al.*, 2019; PEREIRA, 2021; SHARMA *et al.*, 2021).

O uso da microalga *S. obliquus* como fonte de biofertilizante no tratamento T2 substituiu a ureia como fertilizante nitrogenado e reduziu o uso de KCl e MAP em relação ao tratamento T4. Souza *et al.*, (2019) conduziram uma ACV comparando o impacto ambiental da biomassa de microalgas e da ureia como fertilizantes, concluindo que o cultivo de microalgas apresentou impactos mais elevados devido ao alto consumo energético durante a etapa de cultivo. Essa etapa foi igualmente apontada por Yadav, Dubey, Sen (2020) como a mais crítica, responsável por 75% a 85% dos impactos em diversas categorias.

Entretanto, Souza *et al.*, (2019) simularam um cenário onde toda a energia utilizada na produção e colheita da biomassa de microalgas fosse proveniente de fontes fotovoltaicas, substituindo a energia elétrica convencional usada neste estudo. Os resultados dessa simulação indicaram uma redução substancial nos impactos ambientais associados ao biofertilizante de microalgas, com uma diminuição de até 73,07% na categoria de mudanças climáticas, aproximando os impactos ambientais aos observados na produção de ureia. Essa hipótese foi confirmada no presente estudo, no qual a utilização de energia fotovoltaica no cultivo de microalgas contribuiu para a redução dos impactos ambientais, tornando-o menos impactante do que o uso de ureia como fertilizante no tratamento T4.

Portanto, a substituição parcial de fertilizantes químicos pelo biofertilizante de microalgas (tratamento T2) demonstrou não apenas benefícios ambientais, mas também eficácia no desenvolvimento da cultura do milho. Esses resultados são bastante promissores e reforçam a necessidade de mais pesquisas a respeito do uso

de biofertilizantes de microalgas, além de destacar o potencial para o desenvolvimento de fertilizantes agrícolas mais sustentáveis, alinhando produtividade e sustentabilidade.

4. CONCLUSÕES

Os resultados da avaliação do ciclo de vida (ACV) do biofertilizante indicaram que a categoria de maior impacto ambiental é a de consumo de água, o que foi explicado pela característica da matriz energética brasileira, com predominância de geração por hidrelétricas. A segunda categoria mais impactante foi o aquecimento global, cujos valores elevados foram justificados pelo uso de dados primários experimentais em condições de cultivo em escala piloto, superando assim os valores encontrados em estudos laboratoriais na literatura. Em relação às demais categorias de impacto, os resultados foram menos expressivos.

Para minimizar esses impactos, foram sugeridas soluções como a adoção de fontes de energia renováveis, como a energia fotovoltaica ou térmica solar, especialmente nas etapas de cultivo que mais consomem energia, como a secagem.

O estudo comparativo permite concluir que o tratamento com o biofertilizante de microalgas (T2), suplementado com P e K inorgânicos, apresentou impactos ambientais menores que o T4, tratamento com NPK inorgânico, em todas as categorias investigadas. Em sua maioria, os impactos de T2 tiveram valores negativos, indicando uma contribuição positiva para o meio ambiente. A única exceção foi a categoria de depleção de água, onde, apesar do impacto ser positivo, foi menor que o observado no tratamento T4.

Já o tratamento T4 teve impactos ambientais positivos em todas as categorias, sendo que as categorias ecotoxicidade terrestre e eutrofização da água se destacaram, o que pode ser associado ao uso intensivo de fertilizantes químicos.

Dessa forma, a ACV confirmou o potencial favorável do biofertilizante de microalgas sob o ponto de vista ambiental. O biofertilizante substituiu totalmente a ureia como fonte nitrogenada e sua utilização combinada com P e K inorgânico foi mais eficiente que o T4, que utilizou a ureia.

REFERÊNCIAS

ALVARENGA, Paula *et al.* Evaluation of the fertilizer potential of *Chlorella vulgaris* and *Scenedesmus obliquus* grown in agricultural drainage water from maize fields. **Science of The Total Environment** v. 861, n. November 2022, p. 160670 , fev. 2023. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969722077737>>.

ARASHIRO, Larissa T. *et al.* Life cycle assessment of microalgae systems for wastewater treatment and bioproducts recovery: Natural pigments, biofertilizer and biogas. **Science of The Total Environment** v. 847, n. July, p. 157615 , nov. 2022. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969722047131>>.

CASTRO, Jackeline de Siqueira *et al.* Microalgae based biofertilizer: A life cycle approach. **Science of The Total Environment** v. 724, p. 138138 , jul. 2020. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S004896972031651X>>.

CASTRO, Jackeline de Siqueira *et al.* Microalgae biofilm in soil: Greenhouse gas emissions, ammonia volatilization and plant growth. **Science of the Total Environment** v. 574, p. 1640–1648 , 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.08.205>>.

CHISTI, Yusuf. Large-Scale Production of Algal Biomass. **Green Energy and Technology** n. March, p. 344 , 2016. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-12334-9>>.978-3-319-12333-2.

DE SOUZA, Mauro Henrique Batalha *et al.* Soil application of microalgae for nitrogen recovery: A life-cycle approach. **Journal of Cleaner Production** v. 211, p. 342–349 , 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.097>>.

DINESHKUMAR, R. *et al.* The Impact of Using Microalgae as Biofertilizer in Maize (*Zea mays* L.). **Waste and Biomass Valorization** v. 10, n. 5, p. 1101–1110 , 2019. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s12649-017-0123-7>>.0123456789.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Relatório Síntese 2023 - BEN 2023. Ministério de Minas e Energia - MME** [S.l: s.n.], 2022.

GABER, Kirsten; RÖSCH, Christine; BIONDI, Natascia. Life Cycle Assessment of

Total Fatty Acid (TFA) Production from Microalgae *Nannochloropsis oceanica* at Different Sites and Under Different Sustainability Scenarios. **Bioenergy Research** v. 15, n. 3, p. 1595–1615 , 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s12155-021-10279-z>>.0123456789.

HAUSCHILD, Michael Z.; ROSENBAUM, Ralph K.; OLSEN, Stig Irving. **Life cycle assessment**. [S.l: s.n.], 2018. 29–42 p. 11 v.9783319564746.

HOSSAIN, Nazia; ZAINI, Juliana; INDRA MAHLIA, Teuku Meurah. Life cycle assessment, energy balance and sensitivity analysis of bioethanol production from microalgae in a tropical country. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** v. 115, n. August, p. 109371 , 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109371>>.

MARTINS, MARCIO ARÊDES PEDRUZI, GERSON OVIDIO LUZ; PEREIRA, EMANUELE GRACIOSA; NUNES-NESE, ADRIANO; MENDES, LEONARDO BRANTES BACELLAR; JOAO, Rafael Richard. *Vertical-flow agitation system for microalgae cultivation tanks* . Estados Unidos: [s.n.] , 2021

PEREIRA, ALEXIA SALEME AONA DE PAULA. FERTILIZANTE ORGANOMINERAL DE MICROALGAS CULTIVADAS EM ÁGUA RESIDUÁRIA: POTENCIAL AGRÍCOLA E CICLO DE VIDA. v. 3, n. 2, p. 6 , 2021.

PRADO, Larissa de Oliveira *et al.* Microalgal cultivation in open and closed systems under a tropical climate: A life cycle comparison. **Journal of Cleaner Production** v. 422, n. April, p. 138631 , 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138631>>.

ROCHA, Dilson Novais *et al.* Combination of trace elements and salt stress in different cultivation modes improves the lipid productivity of *Scenedesmus* spp. **Bioresource Technology** v. 289, n. June, p. 121644 , 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121644>>.

SARANYA, G.; RAMACHANDRA, T. V. Life cycle assessment of biodiesel from estuarine microalgae. **Energy Conversion and Management: X** v. 8, n. December, p. 100065 , 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2020.100065>>.0000000155281.

SHARMA, Gulshan Kumar *et al.* Circular economy fertilization: Phycoremediated algal biomass as biofertilizers for sustainable crop production. **Journal of Environmental Management** v. 287, n. February, p. 112295 , jun. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112295>>.

TSAI, David *et al.* Análise das emissões de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil. **Instituto de Energia e Meio Ambiente** p. 34 , 2023.

YADAV, Geetanjali; DUBEY, Brajesh K.; SEN, Ramkrishna. A comparative life cycle assessment of microalgae production by CO₂ sequestration from flue gas in outdoor raceway ponds under batch and semi-continuous regime. **Journal of Cleaner Production** v. 258, p. 120703 , 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120703>>.