

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS DO PONTAL
CURSO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS

BRUNO PRADO BORDINI PARIS

Microalgas como biofertilizantes: Uma revisão bibliográfica

ITUIUTABA- MG

2025

BRUNO PRADO BORDINI PARIS

Microalgas como biofertilizantes: Uma revisão bibliográfica

Trabalho de Conclusão de Curso da
Universidade Federal de Uberlândia como
requisito parcial para obtenção do título de
bacharel em Ciências Biológicas

Área de concentração: Botânica Aplicada

Orientador: Lucas Matheus da Rocha

ITUIUTABA- MG

2025

AGRADECIMENTOS

Queria agradecer primeiramente a Deus, por sempre me proteger e me guiar para o caminho do amor e da luz. Agradecer a minha família, especialmente aos meus pais, que sempre estiveram ao meu lado, me apoiando e me dando forças para sempre continuar e nunca desistir dos meus sonhos. Aos meus avós, que sempre cuidaram de mim e me mostraram o lado bom da vida. A minha incrível namorada Gabriela, que sempre me apoiou e sempre acreditou em mim e nos meus sonhos. Aos meus amigos, que sempre estiveram comigo nas horas boas e nas horas ruins, dando dicas, me trazendo alegria e, principalmente me apoiando nas minhas decisões. Agradecer a Universidade Federal de Uberlândia por ter me dado a incrível oportunidade de me tornar um biólogo. Ao meu orientador Lucas, que foi uma das pessoas mais legais e incríveis que eu tive o prazer de conhecer e de ser seu aluno. Me ajudou quando eu mais precisava de ajuda. E, por fim, mas não menos importante, queria agradecer imensamente a maior república de todas, a Cabô Caqui, no qual me acolheram e me mostraram o que é poder fazer parte de uma família em outra cidade. Obrigado a todos os moradores atuais e ex moradores que fizeram da minha vida em Ituiutaba muito mais feliz, leve e cheia de aventuras.

RESUMO

As microalgas, organismos fotossintetizantes de origem polifilética, destacam-se por seu rápido crescimento, adaptabilidade e viabilidade econômica em cultivos de pequena escala. Essas características possibilitam sua produção em áreas restritas ou inóspitas à agricultura convencional, tornando-as uma alternativa sustentável. Este trabalho tem como objetivo reunir o conhecimento científico sobre o uso de microalgas como biofertilizantes, por meio de uma revisão crítica da literatura. A metodologia consistiu na análise de publicações indexadas em bases acadêmicas, com foco na identificação das principais espécies e gêneros utilizados, bem como nas culturas agrícolas associadas. A busca foi realizada no Google Acadêmico, com o termo "microalgas na produção de biofertilizantes", resultando em 814 publicações. Após critérios de seleção baseados em relevância metodológica e aplicabilidade, 19 estudos foram incluídos na análise. Os biofertilizantes microalgais representam uma solução promissora para aliar produtividade agrícola à sustentabilidade ambiental. Contudo, sua adoção em larga escala depende do avanço tecnológico, de incentivos políticos e da ampliação da divulgação científica. Conclui-se que as microalgas possuem potencial para substituir parcialmente os fertilizantes sintéticos, oferecendo vantagens econômicas e ambientais, desde que superados desafios operacionais e estruturais. Sua utilização configura-se como uma estratégia relevante para promover práticas agrícolas sustentáveis, principalmente para algumas espécies cujo cultivo e aplicações já estão bem estabelecidos.

Palavras-chave: biofertilizantes; bioestimulantes; agricultura sustentável; bioeconomia.

ABSTRACT

Microalgae, photosynthetic organisms of polyphyletic origin, stand out for their rapid growth, adaptability, and economic viability in small-scale cultivation. These characteristics enable their production in restricted or inhospitable areas for conventional agriculture, making them a sustainable alternative. This work aims to gather scientific knowledge on the use of microalgae as biofertilizers through a critical literature review. The methodology consisted of analyzing publications indexed in academic databases, focusing on identifying the main species and genera used, as well as the associated agricultural crops. The search was conducted on Google Scholar using the term "microalgae in biofertilizer production," resulting in 814 publications. After selection criteria based on methodological relevance and applicability, 19 studies were included in the analysis. Microalgal biofertilizers represent a promising solution to combine agricultural productivity with environmental sustainability. However, their large-scale adoption depends on technological advancements, political incentives, and increased scientific dissemination. It is concluded that microalgae have the potential to partially replace synthetic fertilizers, offering economic and environmental advantages, provided operational and structural challenges are overcome. Their use is configured as a relevant strategy to promote sustainable agricultural practices, especially for some species whose cultivation and applications are already well established.

Keywords: biofertilizers; biostimulants; sustainable agriculture; bioeconomy.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Características dos fertilizantes orgânicos, conforme IN nº 61 de 08/07/2020	12
Figura 2 – Meio de Cultura de <i>Chlorella</i> sp.	15
Figura 3 – Meio de Cultura de <i>Chlorella</i> sp. (Recipiente C apresentou contaminação)	18
Figura 4 – Quadro com meios de cultura de algas	19

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	13
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
4	METODOLOGIA	16
5	RESULTADOS.....	17
6	DISCUSSÃO.....	18
7	CONCLUSÃO	19
8	REFERÊNCIAS	20

1 INTRODUÇÃO

As microalgas constituem um conjunto fotossintético de natureza polifilética, caracterizadas por suas dimensões microscópicas, englobando tanto organismos eucarióticos, quanto cianobactérias de natureza procariótica. Esses microrganismos destacam-se por possuir atributos distintivos, tais como elevadas taxas de crescimento, facilidade de cultivo, custos operacionais reduzidos e notável capacidade de adaptação a diversos ambientes. Tais características viabilizam a implantação de sistemas de cultivo em áreas de dimensões reduzidas e em regiões comumente consideradas inaptas para atividades agrícolas tradicionais (Wang *et al.*, 2014; Odjadjare *et al.*, 2017).

As microalgas assimilam nutrientes essenciais provenientes de substratos terrestres ou de ecossistemas aquáticos, realizam a captação de energia luminosa por meio de processos fotossintéticos, fixam dióxido de carbono (CO₂) atmosférico e desempenham um papel crucial na produção de aproximadamente 50% do oxigênio presente na atmosfera terrestre (Rizwan *et al.*, 2018).

De acordo com Brasil (2016), a biomassa de algas oferece vantagens significativas frente a matérias-primas tradicionais, destacando-se pela alta produtividade, geralmente 10 a 100 vezes superior à das culturas agrícolas convencionais, pela eficiência na captura de carbono e pela composição rica em lipídeos (utilizados na produção de biodiesel) e amido (aplicável na obtenção de etanol). Além disso, as algas podem ser cultivadas em diversos tipos de água, incluindo doce, salobra, marinha ou mesmo efluentes, e adaptam-se a terras não agricultáveis.

As microalgas, em particular, dispensam solos férteis e demandam menos pureza na água, podendo ser cultivadas em fontes não potáveis. Essa característica as torna úteis na biorremediação de efluentes urbanos, agropecuários e industriais. Assim, seu cultivo em escala comercial configura-se como uma alternativa sustentável para a integração de múltiplas cadeias produtivas (BRASIL, 2016).

O crescente interesse na utilização de microrganismos, como as microalgas, decorre de seu papel fundamental em diversas cadeias ecológicas, atuando como base da produção biológica nos ecossistemas aquáticos. Além disso, seu potencial comercial abrange múltiplos setores, incluindo nutrição humana e animal, indústria cosmética, fabricação de pigmentos, desenvolvimento de biofertilizantes, produção de isótopos estáveis para estudos bioquímicos, bem como síntese de compostos farmacêuticos com ação antiviral, antibacteriana e antimicrobiana (BRASIL, 2016).

Esses organismos destacam-se pela capacidade de sintetizar uma variedade de substâncias bioativas, como antioxidantes, carotenoides, lipídios, pigmentos naturais, ácidos graxos polinsaturados, peptídeos, toxinas e esteróis, os quais possuem ampla aplicação em diversos segmentos industriais. (SUNGANYA *et al.* 2017; MORENO-GARCIA, 2016).

Diversas espécies são cultivadas em escala comercial em certas nações, e a biomassa gerada tem servido como matéria-prima para a produção de ingredientes destinados à indústria alimentícia. De acordo

com Pulz & Gross (2004), o segmento de alimentos funcionais, que incorpora microalgas em massas, pães, iogurtes e bebidas, está em rápido crescimento em países como França, Estados Unidos, China e Tailândia. As microalgas mais cultivadas para fins comerciais incluem representantes dos gêneros *Chlorella* Beijerinck (Chlorophyceae) e *Arthrospira* Stizenberger (Cyanophyceae), usadas em alimentos naturais ("health food"); *Dunaliella salina* Teodoresco (Chlorophyceae), cultivada para extração de betacaroteno; *Haematococcus pluvialis* Flotow (Chlorophyceae), destinada à produção de astaxantina; e *Spirulina platensis*, empregada na obtenção de proteínas (DERNER, 2006).

O setor agrícola tem registrado expressivos avanços em produtividade nas últimas décadas. A garantia da segurança alimentar está intrinsecamente vinculada a transformações nos sistemas de produção agrícola, de modo que a adoção de práticas sustentáveis surge como uma estratégia essencial. No entanto, projeções indicam um aumento de aproximadamente 60% na produção agrícola nos próximos trinta anos, impulsionado pelo crescimento populacional. Diante desse cenário, conciliar elevados níveis de produtividade com a redução de impactos ambientais configura-se como um desafio crítico (ALVAREZ *et al.*, 2021).

Nesse contexto, torna-se imperativo adotar práticas agrícolas capazes de incrementar a produtividade das culturas de modo sustentável. As microalgas emergem como uma solução promissora para os desafios contemporâneos da agricultura, destacando-se pela sua aplicação como bioestimulantes e biofertilizantes vegetais, além de conferirem proteção contra patógenos (GARCIA-GONZALEZ & SOMMERFELD, 2016; SUPRAJA *et al.*, 2020; ALVAREZ *et al.*, 2021; ANDRADE *et al.*, 2021; KAPOORE *et al.*, 2021).

As microalgas apresentam relevante potencial de aplicação no âmbito agrícola, destacando-se por suas propriedades biofertilizantes e condicionadoras de solos. No exercício dessas funções, evidenciam capacidade de realizar fixação biológica de nitrogênio e contribuir significativamente para a mitigação dos processos erosivos. Adicionalmente, metabólitos secundários de natureza alelopática derivados desses microrganismos mostram eficácia como alternativas sustentáveis no controle de plantas daninhas e como agentes de proteção vegetal (BENEDITO *et al.*, 2019).

Os sistemas baseados em microalgas demonstram elevado potencial no âmbito energético, econômico e na biorremediação de efluentes provenientes da atividade pecuária. Tais sistemas propiciam a geração de água tratada e a produção de biomassa, a qual pode ser empregada como biopesticidas e bioestimulantes, visando fomentar práticas agrícolas sustentáveis no contexto de uma bioeconomia circular. Essa abordagem integrada contribui para a otimização de recursos e a redução de impactos ambientais, alinhando-se aos princípios de sustentabilidade e eficiência (FERREIRA *et al.*, 2021).

Os biofertilizantes caracterizam-se como formulações contendo consórcios microbianos viáveis que, quando inoculados em sementes, tecidos vegetais ou substratos edáficos, colonizam ativamente a rizosfera ou os tecidos vegetais, estimulando o desenvolvimento das plantas e incrementando a biodisponibilidade de nutrientes essenciais. A adoção desses insumos orgânicos representa, portanto, uma estratégia viável para a transição agroecológica. No cenário agrícola contemporâneo, observa-se uma demanda crescente por insumos ambientalmente benignos, fenômeno impulsionado pelos progressos na investigação científica de compostos microbianos. Tanto no contexto brasileiro quanto no panorama global, verifica-se um interesse

comercial crescente em pesquisas aplicadas que exploram matrizes biológicas, particularmente microalgas, como matéria-prima para tais formulações (SILVA, 2019).

A técnica de emprego de clorófitas e cianobactérias como biofertilizantes, denominada 'algalização', foi originalmente conceituada por G.S. Venkataraman na década de 1970 (VENKATARAMAN, 1970 *apud* SILVA, 2019). Na contemporaneidade, observa-se um expressivo incremento no interesse científico e mercadológico pela utilização desses microrganismos e seus metabólitos, particularmente no contexto da agricultura orgânica (SILVA, 2019).

A técnica de algalização apresenta um potencial distintivo para otimizar a produtividade agrícola em múltiplos contextos agroecológicos, atuando como fator determinante no incremento da fertilidade edáfica e, conseqüentemente, na potencialização da eficiência produtiva. Estudos científicos, como o de Carneiro e colaboradores (2018), demonstram que a aplicação de microalgas como suplemento ao substrato edáfico promove melhorias estatisticamente relevantes em parâmetros fisiológicos e agrônômicos, incluindo taxa de germinação, eficiência de reciclagem de nitratos, desenvolvimento radicular, síntese de pigmentos fotossintéticos, produtividade de grãos e crescimento vegetativo (CARNEIRO *et al.*, 2018).

Conforme demonstrado por Silva *et al.* (2020), a utilização de microalgas como fertilizantes orgânicos apresenta múltiplos benefícios agrônômicos, destacando-se pela capacidade de intensificar os processos de fixação biológica de nitrogênio, melhorar as propriedades físico-químicas do solo e induzir a produção de metabólitos bioativos que favorecem tanto o desenvolvimento vegetal quanto a defesa contra patógenos.

A biotecnologia assume uma posição estratégica na validação das microalgas como recurso sustentável, cuja viabilidade comercial depende diretamente do desenvolvimento de metodologias otimizadas. O desempenho dos cultivos algáceos está fundamentalmente associado à sua capacidade fotobioquímica de conversão eficiente de energia luminosa em biomassa e compostos lipídicos (DOURADO *et al.*, 2020).

Diante do exposto, o presente trabalho tem como objetivo conduzir uma análise crítica e sistematizada da literatura científica atual sobre o emprego de microalgas como biofertilizantes na agricultura, por meio de uma revisão integrativa. Busca-se, especificamente, identificar as espécies de microalgas de maior relevância agrônômica, elucidar seus mecanismos de ação como promotoras do desenvolvimento vegetal e investigar suas aplicações práticas em diversos sistemas de cultivo.

2 OBJETIVO

- 2.1 Objetivo geral:

- Sintetizar a bibliografia atual sobre o cultivo de microalgas como biofertilizante, realizando uma revisão bibliográfica para reunir e explorar as principais espécies e suas aplicações na agricultura.

- 2.2 Objetivos específicos:

- Realizar um levantamento bibliográfico em diferentes plataformas de acesso a periódicos;
- Reunir as principais espécies ou gêneros cultivados como biofertilizantes;
- Discutir as principais culturas utilizadas nesses artigos.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1- MICROALGAS

As microalgas desempenham um papel crucial na sustentabilidade ambiental, destacando-se principalmente por sua capacidade de converter dióxido de carbono (CO₂) em oxigênio (O₂) por meio da fotossíntese. Como constituintes fundamentais da base da cadeia trófica aquática, são as principais responsáveis pela produção de biomassa nesses ecossistemas, sustentando direta e indiretamente a vida no planeta. Além disso, a biotecnologia de microalgas tem se consolidado como um pilar emergente da bioeconomia, gerando biomassa de alto valor agregado para diversas aplicações antropocêntricas, incluindo fármacos, cosméticos, suplementos alimentares e rações animais. Não obstante, o potencial desses microrganismos ainda é subexplorado, havendo oportunidades significativas para ampliar sua capacidade produtiva e desenvolver novas aplicações biotecnológicas. Dentre as possibilidades mais promissoras, destacam-se a produção de biocombustíveis, compostos químicos especializados e biofertilizantes, além de serviços ambientais como o tratamento de efluentes e a biorremediação de gases poluentes (FERNÁNDEZ *et al.*, 2021).

O termo "microalgas" abrange tanto microalgas eucarióticas quanto cianobactérias procarióticas. Apesar de suas diferenças filogenéticas, ambos os grupos realizam fotossíntese oxigenada de modo semelhante e são cultivados mediante princípios e tecnologias análogas. O cultivo de microalgas ocorre predominantemente em meio aquoso, demandando sistemas de produção especificamente projetados. O dimensionamento desses sistemas deve considerar não apenas o conhecimento científico prévio, mas também as exigências dos mercados consumidores em termos de escala produtiva, padrões de qualidade e viabilidade econômica. Ademais, as microalgas destacam-se por sua versatilidade fisiológica, permitindo cultivos sob condições ambientais variadas – fato evidenciado por sua produção em diversas regiões geográficas. Outra vantagem relevante reside na possibilidade de cultivá-las sem competir por recursos essenciais a outras atividades humanas, como água potável ou solos agricultáveis (FERNÁNDEZ *et al.*, 2021).

As microalgas apresentam características que as tornam organismos altamente promissores para aplicações sustentáveis, como sua elevada taxa de crescimento, com tempos de duplicação inferiores a 24 horas em condições ideais, além de alta produtividade de biomassa, podendo ultrapassar 100 toneladas por hectare/ano em peso seco. Adicionalmente, exibem eficiência fotossintética de até 10%, utilizando predominantemente energia solar como fonte primária de energia. Esses atributos as posicionam como candidatas ideais para impulsionar processos biotecnológicos alinhados aos princípios da bioeconomia circular. Contudo, é importante ressaltar que os valores mencionados frequentemente refletem condições laboratoriais otimizadas. Em sistemas de larga escala, sob condições ambientais reais, observa-se uma redução significativa no desempenho: o tempo de duplicação pode exceder 48 horas, a produtividade de biomassa frequentemente não ultrapassa 40 t/ha/ano, e a eficiência fotossintética decai para aproximadamente 3% (FERNÁNDEZ *et al.*, 2021).

3.1.1- CLASSIFICAÇÃO DAS MICROALGAS

De acordo com Wojciechowski (2013), a classificação tradicional das microalgas fundamenta-se primordialmente na composição pigmentar, na natureza química dos compostos de reserva e nos constituintes da parede celular. Adicionalmente, critérios citomorfológicos são empregados nessa sistematização, incluindo a ocorrência de células flageladas, a ultraestrutura flagelar, os mecanismos de divisão nuclear e celular, a presença e organização do envoltório cloroplástico, bem como eventuais conexões entre o retículo endoplasmático e a membrana nuclear. Paralelamente a esses parâmetros clássicos, técnicas moleculares modernas vêm sendo progressivamente incorporadas como ferramentas auxiliares na taxonomia desses organismos.

As microalgas constituem um grupo morfofisiológico e filogeneticamente heterogêneo, compreendendo predominantemente organismos aquáticos de organização unicelular microscópica, embora possam ocorrer sob forma colonial com limitada diferenciação celular. Sua coloração diversificada - atributo diagnóstico relevante - deriva da composição pigmentar específica e de seu metabolismo fotoautotrófico. Do ponto de vista filogenético, as microalgas representam um conjunto polifilético, cujos representantes estão distribuídos em pelo menos cinco grandes linhagens eucarióticas, além de um significativo grupo procariótico (cianobactérias). Conseqüentemente, o termo "microalgas" carece de validade taxonômica formal, funcionando antes como uma designação operacional para micro-organismos fotossintetizantes portadores de clorofila a e pigmentos acessórios, capazes de realizar fotossíntese oxigenada (WOJCIECHOWSKI, 2013).

3.2- FATORES DE CRESCIMENTO DAS MICROALGAS

Em conformidade com Wojciechowski (2013), os organismos fitoplanctônicos exibem um repertório diversificado de adaptações morfofisiológicas em resposta às variáveis abióticas e bióticas dos ecossistemas aquáticos, mecanismos estes essenciais para garantir sua sobrevivência e desenvolvimento populacional. O metabolismo algal demonstra sensibilidade acentuada às flutuações nos parâmetros físico-químicos do meio, com particular vulnerabilidade aos fatores limitantes do crescimento. Em condições laboratoriais controladas, observa-se que a radiação luminosa e a temperatura constituem os principais elementos regulatórios da dinâmica proliferativa desses microrganismos.

3.2.1- LUZ

Os fatores luminosos que exercem maior influência sobre os processos fotossintéticos nas algas compreendem a intensidade luminosa, definida como a densidade de fluxo fotônico incidente por unidade de área, e a qualidade espectral, referente à distribuição relativa dos diversos comprimentos de onda no espectro

eletromagnético. Dentre os comprimentos de onda, destaca-se o efeito prejudicial da radiação ultravioleta, particularmente na faixa UV-B, sobre os complexos proteicos envolvidos no aparato fotossintético. Contudo, a maior parte dessa radiação nociva é efetivamente filtrada pela camada de ozônio (O₃) presente na estratosfera (WOJCIECHOWSKI, 2013).

O processo fotossintético nas algas é possibilitado pela utilização de uma específica faixa espectral compreendida entre 400 e 700 nanômetros, denominada Radiação Fotossinteticamente Ativa (RFA ou PAR, do inglês *Photosynthetically Active Radiation*). Esta região do espectro luminoso, que corresponde à porção visível da luz solar, é energeticamente aproveitável pelos pigmentos fotossintéticos, servindo como base para a conversão da energia luminosa em energia química através dos mecanismos fotoautotróficos (WOJCIECHOWSKI, 2013).

3.2.2- TEMPERATURA

A temperatura constitui um parâmetro ambiental crítico na modulação das reações bioquímicas fundamentais aos processos metabólicos, incluindo os mecanismos fotossintéticos e respiratórios. Essa relação termodinâmica direta se manifesta na dinâmica populacional do fitoplâncton, cuja taxa de crescimento exibe correlação positiva com a elevação térmica, dentro de limites fisiológicos que geralmente não excedem 35-40°C. Além de seu impacto cinético, a temperatura pode induzir alterações morfológicas significativas nas células fitoplanctônicas (WOJCIECHOWSKI, 2013).

Observa-se que espécies com organização cenobial ou filamentosa, como os gêneros *Stichococcus* e *Scenedesmus*, sofrem desagregação em unidades celulares individuais quando submetidas a condições termicamente elevadas. Paralelamente, outros táxons, incluindo representantes do gênero *Synechococcus* e diversas desmídias, apresentam variações dimensionais celulares em resposta a flutuações térmicas. Essas modificações morfofisiológicas representam adaptações plásticas aos gradientes térmicos ambientais, demonstrando a sensibilidade dos organismos fitoplanctônicos às variações de temperatura (WOJCIECHOWSKI, 2013).

3.2.3- OXIGÊNIO E GÁS CARBÔNICO

Os gases oxigênio (O₂) e dióxido de carbono (CO₂) estabelecem uma relação de interdependência bioquímica através dos processos complementares de fotossíntese e respiração celular. O oxigênio molecular, essencial para diversas reações metabólicas, é continuamente gerado como subproduto do processo fotossintético quando as condições de luminosidade e disponibilidade de nutrientes são adequadas. Contudo, sua concentração em ambientes aquáticos permanece relativamente baixa, resultado combinado de sua reduzida pressão parcial atmosférica e limitada solubilidade em meio aquoso (WOJCIECHOWSKI, 2013).

As concentrações dissolvidas de CO₂ exibem tipicamente uma relação inversamente proporcional às de O₂. Apesar de apresentar pressão parcial atmosférica significativamente inferior à do oxigênio, o dióxido

de carbono demonstra solubilidade aproximadamente trinta vezes maior, tornando-o quantitativamente mais abundante em sistemas aquáticos. Além do processo de difusão atmosférica, a principal fonte de CO_2 na água decorre da atividade respiratória de organismos animais e vegetais, servindo simultaneamente como substrato fundamental para a fixação fotossintética de carbono. Quando dissolvido em água, o CO_2 sofre hidratação formando ácido carbônico (H_2CO_3), o qual subsequentemente se dissocia em espécies iônicas variáveis (CO_2 , HCO_3^- , CO_3^{2-}) em função do pH do meio (WOJCIECHOWSKI, 2013).

A temperatura emerge como o parâmetro ambiental preponderante na regulação das concentrações desses gases em ecossistemas aquáticos. Não obstante, outros fatores exercem influência significativa, incluindo a atividade fotossintética, os processos respiratórios, reações de oxidação química, variações na pressão atmosférica e a altitude do corpo d'água. Esta complexa interação de variáveis físicas, químicas e biológicas determina o equilíbrio dinâmico desses gases cruciais para os processos ecológicos em ambientes aquáticos (Wojciechowski, 2013).

3.2.4- pH

O pH, definido como o logaritmo negativo da concentração de íons hidrogênio (H^+), constitui um parâmetro fundamental para a caracterização química de sistemas aquáticos, sendo classificado em três faixas principais: ácido (0-6,5), neutro (6,5-7,5) e alcalino (7-14). A maioria dos ecossistemas aquáticos naturais apresenta valores de pH situados entre 6 e 9, faixa que favorece a manutenção dos processos biológicos essenciais (WOJCIECHOWSKI, 2013).

As flutuações no pH promovem alterações significativas no equilíbrio químico de diversos compostos essenciais ao metabolismo algal, incluindo dióxido de carbono (CO_2), fosfatos, amônia, ferro e metais traço. Essas modificações no estado químico desses elementos podem influenciar diretamente sua biodisponibilidade e toxicidade para os organismos fotossintetizantes (WOJCIECHOWSKI, 2013).

Além desses efeitos indiretos, o pH exerce influência direta sobre o metabolismo das microalgas através de múltiplos mecanismos. Em conjunto com outros fatores ambientais, o pH regula processos cruciais como a permeabilidade seletiva das membranas celulares, os mecanismos de transporte iônico e a cinética das reações enzimáticas. Esses efeitos combinados tornem o pH um dos parâmetros mais críticos para o crescimento e desenvolvimento das comunidades algáceas em ambientes aquáticos (WOJCIECHOWSKI, 2013).

3.2.5- MACRONUTRIENTES

As microalgas obtêm seus requisitos nutricionais a partir de duas categorias distintas de elementos essenciais: macronutrientes e micronutrientes. Os macronutrientes, demandados em concentrações relativamente elevadas, desempenham funções estruturais e metabólicas fundamentais nos processos fisiológicos desses organismos fotossintetizantes. Estes elementos participam ativamente na constituição celular e nos principais ciclos bioquímicos que sustentam o crescimento e desenvolvimento algal

(WOJCIECHOWSKI, 2013).

3.2.6- MICRONUTRIENTES

Wojciechowski (2013) destaca que meios de cultivo para microalgas necessitam de traços de micronutrientes como Zn, Cu, Mn, Co, Mo e B. Enquanto meios com água natural geralmente contêm esses elementos, formulações sintéticas ultrapuras exigem suplementação específica.

Estes micronutrientes, embora requeridos em quantidades mínimas, são essenciais como cofatores enzimáticos. Sua ausência pode inibir processos metabólicos fundamentais, tornando crucial seu balanceamento preciso em formulações de cultivo otimizadas (WOJCIECHOWSKI, 2013).

3.2.7- NITROGÊNIO

Em sintonia com Wojciechowski (2013), o nitrogênio representa um elemento essencial no metabolismo algal, constituindo o segundo nutriente mais demandado após o carbono, com participação aproximada de 12% na composição celular. Este elemento desempenha funções estruturais e funcionais críticas, integrando a composição molecular de proteínas, enzimas catalíticas e ácidos nucleicos, componentes fundamentais dos processos bioquímicos e da informação genética. Além disso, o nitrogênio participa da constituição de diversas moléculas orgânicas, como aminoácidos e peptídeos, bem como de compostos inorgânicos, incluindo amônia (NH_3), nitrato (NO_3^-) e nitrogênio molecular (N_2).

Nos ecossistemas aquáticos, o nitrogênio ocorre sob múltiplas formas químicas: nitrogênio molecular (N_2), que predomina na coluna d'água; formas inorgânicas dissolvidas (NO_3^- , NO_2^- , $\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$, N_2O); nitrogênio orgânico dissolvido (NOD), representado por compostos como ureia e purinas; e nitrogênio orgânico particulado (NOP), constituído por material biológico e detritos. As principais fontes naturais de nitrogênio incluem a deposição atmosférica via precipitação, aporte alóctone de material orgânico e inorgânico proveniente de processos de lixiviação e transporte fluvial, além da fixação biológica de N_2 in situ (WOJCIECHOWSKI, 2013).

Dentre as formas disponíveis, nitrato e amônia destacam-se como as fontes preferenciais para os produtores primários, devido à sua abundância relativa e à eficiência energética nos processos de assimilação celular. Em condições de limitação desses compostos, muitas espécies fitoplanctônicas demonstram capacidade de utilizar nitrito ou compostos orgânicos dissolvidos, cuja origem deriva principalmente de processos de lise celular, decomposição de matéria orgânica e excreção por organismos aquáticos (WOJCIECHOWSKI, 2013).

A disponibilidade de nitrogênio frequentemente atua como fator limitante para a produção primária fitoplanctônica. Contudo, as cianobactérias apresentam vantagem competitiva nesse contexto, devido à sua capacidade exclusiva de fixar nitrogênio atmosférico, tornando-as menos susceptíveis à limitação por formas

dissolvidas deste nutriente. Esta adaptação metabólica confere às cianobactérias significativa vantagem ecológica em ambientes oligotróficos ou sujeitos a flutuações na disponibilidade de nitrogênio (WOJCIECHOWSKI, 2013).

3.2.8- FÓSFORO

O fósforo é essencial para processos bioquímicos, atuando no armazenamento energético (ATP/ADP), estrutura do DNA/RNA e composição de membranas (fosfolípidios) (WOJCIECHOWSKI, 2013). Embora demandado em baixas concentrações (razão N:P de 16:1), é o principal limitante da produtividade em ecossistemas aquáticos, devido à sua baixa disponibilidade em formas acessíveis (WOJCIECHOWSKI, 2013). Em águas doces, ocorre como fosfatos orgânicos, inorgânicos e particulados, sendo o ortofosfato (PO_4^{3-}) a forma preferencialmente assimilada por algas, por sua alta biodisponibilidade (WOJCIECHOWSKI, 2013).

3.2.9- SÍLICA

A sílica ocorre em ecossistemas aquáticos nas formas solúvel, coloidal e particulada, sendo apenas a solúvel biologicamente relevante (WOJCIECHOWSKI, 2013). É essencial para diatomáceas (Bacillariophyceae), cujas frústulas contêm até 90% de sílica, e é utilizada por crisofíceas e heliozoários para reforço celular, na forma hidratada ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) (WOJCIECHOWSKI, 2013). Sua disponibilidade regula a dinâmica de diatomáceas, influenciando sua distribuição e competitividade em ecossistemas aquáticos (WOJCIECHOWSKI, 2013).

4- FERTILIZANTES E BIOFERTILIZANTES

Os fertilizantes são substâncias minerais ou orgânicas, naturais ou sintéticas, fornecedoras de um ou mais nutrientes de plantas (BRASIL, 2004). Já os biofertilizantes são produtos que incluem um agente ativo ou orgânico, livre de substâncias químicas nocivas, que podem influenciar, de forma direta ou indireta, o aumento da produtividade total ou parcial das plantas cultivadas (BRASIL, 2020).

A introdução de microalgas como produtos relacionados à agricultura é uma abordagem promissora para reduzir ou até substituir o uso de produtos químicos não renováveis, sem comprometer a produtividade das plantas (DAGNAISSER, 2023 apud FERREIRA *et al.*, 2021).

As aplicações emergentes de microalgas incluem a produção de produtos relacionados à agricultura, como biofertilizantes, bioestimulantes e biopesticidas, tornando o cultivo de alimentos mais sustentável (DAGNAISSER, 2023 apud FERNÁNDEZ *et al.*, 2021).

Atualmente, o maior desafio para desenvolver mais bioprodutos de microalgas em nível comercial é levar a produção de escala laboratorial para escala industrial (DAGNAISSER, 2023 apud FERNÁNDEZ *et*

al., 2021).

As microalgas são organismos microscópicos que apresentam uma grande capacidade de transformar substâncias inorgânicas, como CO_2 , NH_4^+ e NO_3^- , em compostos orgânicos, incluindo carboidratos e proteínas (DE MORAIS *et al.*, 2019). Além disso, essas microalgas são ricas em compostos importantes, como aminoácidos, carboidratos, minerais, oligoelementos e fito hormônios, entre outros (COLLA; ROUPHAEL, 2020).

Pesquisas científicas demonstram que a biomassa tem o potencial de favorecer o desenvolvimento das plantas, funcionando como um fertilizante orgânico de liberação gradual, capaz de fornecer nutrientes provenientes de águas residuais e prevenir a poluição do solo e de corpos hídricos em decorrência de excessos nutricionais (ALVAREZ *et al.*, 2021; COPPENS *et al.*, 2016; FERREIRA *et al.*, 2021).

A biomassa de microalgas possui uma alta concentração de aminoácidos, o que traz vantagens para as plantas (MICHALAK; CHOJNACKA, 2015).

Os aminoácidos apresentam um carbono alfa que se liga a um grupo carboxila, a um grupo amino, a um átomo de hidrogênio e a um grupo variável que difere conforme o tipo de aminoácido (DI DOMENICO ZIERO *et al.*, 2020). Eles funcionam como bioestimulantes, o que permite que, mesmo em quantidades reduzidas, beneficiem as plantas, favorecendo o crescimento de raízes e frutos, entre outros aspectos (MICHALAK; CHOJNACKA, 2015). Além dos aminoácidos, as microalgas também contêm fito hormônios, substâncias que se assemelham às auxinas e citocininas, que atuam como estimuladores do crescimento vegetal. As auxinas, em particular, incentivam o desenvolvimento das raízes, o que aumenta a capacidade das plantas de absorver água e nutrientes do solo, tornando-as mais resilientes a situações de estresse (STIRK *et al.*, 2022).

Os fertilizantes minerais representam a principal fonte de nutrientes para o cultivo de alimentos (STEWART *et al.* 2005). Atualmente, a fabricação de fertilizantes à base de fósforo e potássio é originada da extração de rochas finitas, que são fundamentais para sustentar os níveis de produção alimentar atuais e futuros (SIPERT *et al.*, 2020; MANNING, 2015). Nesse cenário, os fertilizantes obtidos de resíduos orgânicos podem surgir como uma alternativa viável para oferecer benefícios ao solo, incluindo a adição de matéria orgânica e nutrientes (ZWETSLOOT *et al.*, 2015).

Os fertilizantes à base de nitrogênio são fundamentais para o crescimento de diversas culturas, mas sua produção industrial demanda uma quantidade significativa de energia fóssil (DE MENDONÇA *et al.*, 2018). Isso resulta em custos elevados em relação ao consumo de energia e gera um impacto ambiental considerável (MENDES JUNIOR *et al.* BUENO, 2015). A ureia se destaca como a forma mais comum e sintética de fertilizante nitrogenado globalmente (BONILLA CEDREZ *et al.*, 2020). No entanto, sua eficiência relativamente baixa, a alta taxa de volatilização e o potencial de poluição das águas devido ao seu uso excessivo são questões preocupantes. A adoção de biofertilizantes na agricultura pode mitigar essas questões, diminuindo a dependência de fertilizantes nitrogenados convencionais, como ureia, sulfato de amônio e nitrato de amônio, o que pode levar a uma redução nos custos agrícolas (DE MENDONÇA *et al.*, 2018a; FERREIRA *et al.*, 2021). Além disso, uma avaliação do uso de biomassa composta por uma

combinação de microalgas (*Chlorella vulgaris*, *Monoraphidium contortum*, *Tetrastrum* sp., entre outras) cultivadas em águas residuais da pecuária revelou que a produtividade de ambos os tipos de fertilizantes – biológico e químico N:P:K 20:0:20 – foi equivalente (LORENTZ *et al.*, 2020).

Os fertilizantes à base de fósforo são obtidos a partir de depósitos geológicos com alto teor de fósforo (rochas fosfatadas), e essa fonte não é renovável, sendo extraída principalmente em apenas três nações globalmente: China, Estados Unidos e Marrocos) (CORDELL *et al.*, 2009). A condição atual dos fertilizantes fosfatados tradicionais é especialmente alarmante, pois os recursos mundiais de fósforo mineral estão se esgotando, e aproximadamente 80% de todo o fósforo utilizado acaba sendo perdido em águas residuais ou superficiais, especialmente em países de clima temperado (ALVAREZ *et al.*, 2021; CORDELL *et al.*, 2009).

Em áreas com clima tropical, como no Brasil, a utilização de fertilizantes à base de fósforo é especialmente importante para a agricultura, uma vez que o fósforo se encontra preso aos minerais de argila nos solos, não estando disponível para as plantas (ABREU *et al.*, 2019; MACHADO *et al.*, 2011). Com a diminuição das reservas de rochas fosfatadas, a expectativa é de que o fósforo se torne cada vez mais caro, aumentando a demanda por fontes alternativas e métodos sustentáveis para a reciclagem desse nutriente (EGLE *et al.*, 2015). As microalgas podem ser uma solução viável para a recuperação de fósforo de águas residuais e podem atuar como biofertilizantes ricos em fósforo (SOLOVCHENKO *et al.*, 2016). Além disso, o fósforo é essencial para o desenvolvimento das microalgas, pois participa de diversas funções metabólicas, incluindo a liberação de energia, e a produção de lipídios, proteínas e coenzimas (HUSSAIN *et al.*, 2021).

O potássio, assim como o nitrogênio e o fósforo, é um mineral fundamental para a agricultura. Análises de produção e consumo de fertilizantes contendo N, P e K em nível global indicam que a fabricação de fertilizantes à base de potássio deve ser duplicada para satisfazer as demandas da população mundial atual (MANNING, 2015). A diminuição das reservas de sais de potássio e a instabilidade nos preços do cloreto de potássio têm gerado preocupação sobre a possibilidade de escassez desse nutriente, especialmente em nações que dependem da importação de fertilizantes para manter sua produção agrícola (SIPERT *et al* 2020). Em 2021, quatro países (Canadá, Rússia, Belarus e China) responderam por cerca de 80% da produção global de potássio (USGS, 2022). O Brasil desempenha um papel significativo no comércio mundial de potássio, uma vez que é um dos maiores produtores agrícolas do planeta e depende de um alto consumo de potássio importado devido à baixa disponibilidade desse nutriente em seus solos (KINPARA, 2003). Após a avaliação e mensuração de estoques e fluxos de potássio no país (SIPERT *et al* 2020), afirmam que o Brasil deve explorar opções voltadas para a recuperação e reutilização de potássio contido em resíduos e produtos fertilizantes, garantindo que sejam aplicados sem comprometer a qualidade dos solos e das colheitas. A biomassa de microalgas aparece como uma solução viável a ser considerada em substituição aos fertilizantes minerais tradicionais.

Além dos efeitos de bioestímulo, a biomassa de microalgas (ou seus compostos) exerce uma série de impactos positivos em solos e plantas, criando oportunidades para a elaboração de diversos produtos agrícolas baseados em microalgas, voltados para a melhoria do solo, bem como para o cultivo e proteção de plantas (ALVAREZ *et al.*, 2021; FERREIRA *et al.*, 2021; RENUKA *et al.*, 2018). No entanto, é fundamental

identificar cepas de microalgas e/ou suas combinações que apresentem efeitos sinérgicos no desenvolvimento das plantas e na qualidade do solo em diferentes tipos de solo, cultivos e regiões agroclimáticas, a fim de avaliar sua eficácia agrônômica. Além disso, a análise de diversos métodos e prazos de aplicação representa um desafio significativo para a pesquisa científica (ALVAREZ *et al.*, 2021; COSTA *et al.*, 2019).

As microalgas podem ser utilizadas simultaneamente para a purificação de águas residuais e na produção agrícola (ALVAREZ *et al.*, 2021). Isso ocorre porque, enquanto se desenvolvem, elas consomem e acumulam em sua biomassa substâncias que podem poluir os corpos d'água, como nitrogênio e fósforo. A biomassa obtida dessas microalgas pode servir como biofertilizante através da fertirrigação, oferecendo nutrientes como uma alternativa aos fertilizantes tradicionais, além de atuar como biopesticida, protegendo as plantas de patógenos, especialmente fungos e bactérias (FERNÁNDEZ *et al.*, 2021). No entanto, alguns desafios relacionados à utilização de microalgas na fertirrigação, como o entupimento dos tubos, ainda precisam ser mais bem investigados. A fertirrigação é uma abordagem que permite a aplicação de fertilizantes na agricultura irrigada, aumentando a eficiência ao possibilitar o controle da aplicação de acordo com as necessidades das culturas. A chegada dos nutrientes às raízes das plantas é acelerada, uma vez que o fertilizante é disponibilizado em solução líquida, o que permite que, ao ser aplicado no solo, ele se integre rapidamente à solução nutritiva. Isso contrasta com a fertilização tradicional que utiliza nutrientes em forma sólida, a qual requer irrigação adicional para que esses nutrientes se misturem à solução do solo (COELHO *et al.*, 2010).

4.1- TIPOS DE BIOFERTILIZANTES

Existem alguns tipos de biofertilizantes muito usados por pesquisadores e, alguns que estão sendo testado nas grandes industriais agro espalhadas pelo mundo.

4.1.1- BIOFERTILIZANTES DE ORIGEM ANIMAL

De acordo com (FERREIRA, 2023), esterco e urina são frequentemente utilizados como biofertilizantes. Sendo uma biomassa rica em carbono e macronutrientes oriunda de resíduos, essa opção se destaca por ser uma alternativa econômica em relação a outros fertilizantes na agropecuária.

4.1.2- BIOFERTILIZANTES DE ORIGEM VEGETAL

Conforme (FERREIRA, 2023), os resíduos agroflorestais são frequentemente utilizados como fertilizantes naturais ou para melhorar a alimentação animal. Folhas, serragem, grama cortada, ou restos de outras atividades agrícolas como o bagaço da cana-de-açúcar, a vinhaça e a palha de milho são misturadas ao solo e, com a ajuda de microrganismos, seus nutrientes são assimilados pelas plantas cultivadas.

4.1.3- Digestão anaeróbia:

Bactérias anaeróbias há muito tempo são usadas para compostagem e no tratamento de efluentes. Assim, é possível gerar biogás que pode ser purificado, concentrado e canalizado, ou produzir bioenergia (FERREIRA, 2023).

4.1.4- Biofertilizante de origem através das microalgas:

As microalgas podem ser cultivadas em várias condições e ecossistemas, como na água do mar, água doce e efluentes. A biomassa de microalgas é vista como um fertilizante orgânico de liberação lenta, prevenindo a perda de nutrientes do solo através de uma liberação gradual de macro e micronutrientes. Estudos indicam que, após a adubação com biomassa de microalgas, o nitrogênio disponível para as plantas aumentou de 1-4% a 41% após 63 dias. Portanto, espera-se que a quantidade de microalgas não ultrapasse a necessidade de nutrientes da cultura. Esta é uma vantagem quando comparada a outras maneiras de recuperar nutrientes de resíduos orgânicos, como a aplicação de esterco na agricultura, que pode levar à contaminação de nitrogênio nas águas e subterrâneas e causar a volatilização de NH_3 (SHAKEEL A. KHAN, 2018).

Por poderem ser geradas em efluentes, ocorre a redução de custos e a produção se torna mais controlada e sustentável, resultando na alteração do foco dos biofertilizantes de macroalgas para os de microalgas. Por serem simples de cultivar em lagos abertos, foto biorreatores ou efluentes pré-tratados, isso proporciona facilidade no cultivo de microalgas (FERREIRA,2023).

Mas a utilização de microalgas na agricultura tem alguns desafios, a falta de um método padrão para preparar o extrato, a incerteza sobre o melhor momento e técnica de aplicação, além da falta de conhecimento sobre os efeitos específicos de diferentes cepas de microalgas são alguns deles. Para produzir o extrato, alguns processos como a quebra da célula podem necessitar de tecnologias que não são dominadas, como a técnica de “explosão de células” e produtos químicos, como formalina, para preservação (Stirk and Van Staden, 2006).

Todos esses processos tornam o desenvolvimento cada vez mais trabalhoso, e cada vez mais caro. Para facilitar o uso de microalgas na agricultura, esses desafios precisam ser resolvidos, como reduzir as etapas de processamento das algas antes de serem usadas nas plantas. Dessa forma, a aplicação de células vivas pode ser uma das alternativas viáveis. Se a ruptura celular for necessária, o ideal é que nenhum produto químico seja adicionado para garantir a produção sustentável (FERREIRA,2023).

4.2- Utilização dos biofertilizantes:

Os biofertilizantes constituem formulações contendo cepas microbianas viáveis capazes de promover a disponibilização de fósforo inorgânico no solo, incrementando significativamente a produtividade agrícola. Quando formulados a partir de associações simbióticas entre cianobactérias e bactérias do gênero *Rhizobium*,

esses inoculantes apresentam a capacidade adicional de realizar a fixação biológica do nitrogênio atmosférico, conferindo dupla funcionalidade ao produto (NAGANANDA *et al.*, 2010).

Portanto, a utilização de biofertilizantes marca o caminho para um agronegócio mais produtivo, sustentável e adaptável às variações climáticas. Oferecendo uma solução ecológica aos fertilizantes sintéticos, eles promovem uma agricultura que cuida da saúde do solo, minimiza impactos ambientais e valoriza a biodiversidade.

4.3- Biofertilizantes e a legislação brasileira:

O termo “biofertilizante” foi mencionado pela primeira vez na Lei nº 6.894, datada de 16 de dezembro de 1980 (BRASIL, 1980), e definido no Decreto 4.954, de 14 de janeiro de 2004 (BRASIL, 2004). Entretanto, o primeiro registro de um biofertilizante no Brasil, conhecido como Vorax®, foi obtido em dezembro de 2018 (NOTÍCIAS AGRÍCOLAS, 2018), o que ocorreu 38 anos após a sua primeira menção e 14 anos depois de sua definição. Segundo informações da Microquímica Tradecorp, fabricante brasileira do Vorax®, esse biofertilizante é elaborado por meio da fermentação biológica do melão extraído da cana-de-açúcar. Após um longo período de pesquisa em diversas culturas, realizado em colaboração com universidades e fundações, bem como negociação com órgãos reguladores e um investimento significativo, o desenvolvimento de seu processo levou cerca de seis anos para ser finalizado (DA SILVA, 2021).

É possível observar que o extenso tempo dedicado a pesquisas, os significativos aportes financeiros, a validação de eficácia por meio de investigações científicas, os obstáculos regulatórios e, ainda, as demandas relacionadas à caracterização de compostos, microrganismos, métodos de avaliação e a inserção de microrganismos em bancos de germoplasma oficiais, que podem representar riscos à propriedade intelectual das empresas, são fatores que explicam a demora de 38 anos para o lançamento de um produto no mercado (DA SILVA, 2021).

Como a comercialização de biofertilizantes no Brasil é muito oportuna, atualmente não há a grande quantidade de dados oficiais relativos ao seu desempenho comercial torna difícil precisão na análise da evolução do setor no Brasil, portanto, para nortear este estudo, normas legais de 1980 a 2020 são analisadas para orientar ambiente regulatório para biofertilizantes no Brasil (DA SILVA, 2021). A figura 1 apresenta as principais características atribuídas aos fertilizantes orgânicos.

Figura 1- Características dos fertilizantes orgânicos, conforme IN nº 61 de 08/07/2020.

Tipos de Fertilizante	Características do Produto
Orgânico	
Fertilizante orgânico simples	- Produto natural de origem vegetal ou animal, contendo um ou mais nutrientes de plantas.
Fertilizante orgânico misto	- Produto de natureza orgânica, resultante da mistura de dois ou mais fertilizantes orgânicos simples, contendo um ou mais nutrientes de plantas.
Fertilizante orgânico composto	- Produto obtido por processo físico, químico, físico-químico ou bioquímico, natural ou controlado, a partir de matéria-prima de origem industrial, urbana ou rural, animal ou vegetal, isoladas ou misturadas, podendo ser enriquecido de nutrientes minerais, princípio ativo ou agente capaz de melhorar suas características físicas, químicas ou biológicas.
Fertilizante organomineral	Produto resultante da mistura física ou combinação de fertilizantes minerais e orgânicos.

Fonte: DA SILVA, 2021.

4.4- Perspectiva para o uso de bioinsumos no futuro:

A investigação científica e o desenvolvimento de tecnologias avançadas aplicadas aos biocombustíveis revelam-se de primordial importância. Tais avanços constituem elementos cruciais para otimizar sua eficácia operacional e sustentabilidade ambiental, mediante a implementação de novas metodologias e formulações inovadoras.

Neste contexto, observa-se que as pesquisas e os refinamentos técnicos nos processos produtivos e de aplicação encontram-se em contínua evolução, caracterizando um campo dinâmico de progresso científico e tecnológico.

Aumentar as vantagens dos biocombustíveis na agricultura. A tecnologia inovadora neste setor. É crucial para satisfazer as crescentes necessidades por práticas agroflorestais mais sustentáveis (BORTOLOTTI; SAMPAIO, 2022; SOUZA *et al.*, 2022).

O suporte do governo, o estímulo à colaboração entre instituições de ensino superior e acadêmicas. Empresas privadas e o incentivo à implementação de práticas sustentáveis são estratégias fundamentais para o desenvolvimento sustentável. Promover o progresso dos biocombustíveis no setor agroflorestal. As colaborações entre companhias

As empresas do ramo agroflorestal e as instituições de pesquisa têm um papel crucial no desenvolvimento do setor. Incentivo ao uso consciente de biocombustíveis e assecuração de sua proteção ambiental. A cooperação entre diversos participantes do setor agrícola possibilita o progresso conjunto.

Utilização de tecnologias avançadas, além da execução de pesquisas científicas que confirmem sua eficiência dos biocombustíveis. Essas colaborações são fundamentais para estimular o mercado de seguros, biocombustíveis e expandir sua utilização em grande escala (BORTOLOTTI, 2022; SAMPAIO, 2022).

Um elemento crucial para incentivar a adoção em grande escala é a sensibilização dos agricultores acerca das vantagens dos biocombustíveis. Diversos agricultores ainda não estão familiarizados com as ferramentas de gestão, benefícios desses insumos biológicos ou temem substituir ou diminuir o uso de fertilizantes químicos convencionais. Portanto, é crucial investir em programas de educação e treinamentos. Demonstrar aos agricultores os benefícios que podem ser obtidos através do uso de bioinsumos (LIMA, 2023).

4 METODOLOGIA

O trabalho de revisão foi realizado utilizando uma base de dados específica, no caso o Google Acadêmico. Para a base de dados Google Acadêmico, foram utilizados os seguintes termos de busca: *microalgas na produção de biofertilizantes*, sem a utilização de nenhum filtro. Na busca, foram encontrados cerca de 814 artigos referentes a pesquisa selecionada e estudada. O intuito dessa pesquisa foi selecionar dois tipos de trabalhos científicos: artigos científicos de revisão bibliográfica e artigos científicos originais, desde que suas metodologias incluíssem informações relevantes sobre a aplicação de biofertilizantes de microalgas em experimentos científicos e na sua utilização em várias áreas da sociedade. No qual, foram selecionados um total de 19 artigos científicos. A seleção dos 19 artigos que compõem este trabalho foi realizada mediante critérios preestabelecidos, priorizando estudos que abordam a produção de biofertilizantes derivados de microalgas, tanto em pesquisas de referencial teórico quanto em trabalhos originais. O processo de seleção considerou ainda publicações que discutem a aplicação desses biofertilizantes em contextos agrícolas e industriais, com enfoque em sua eficácia e potencial de implementação.

Ademais, privilegiaram-se estudos que exploram o uso de biofertilizantes como alternativa sustentável para diferentes escalas produtivas, desde a agricultura familiar até sistemas industriais. O presente trabalho tem como propósito analisar a relevância dos biofertilizantes para a agricultura contemporânea, bem como identificar as espécies de microalgas mais promissoras para essa finalidade, considerando aspectos como eficiência agrônômica, adaptabilidade ambiental e viabilidade econômica.

Quadro 1- Quadro geral dos artigos selecionados.

Título do Trabalho	Espécie de Microalgas estudadas em cada artigo	Cultura Agrícola	Referências
Estudo do rendimento de biomassa da microalga nativa <i>Chlorella</i> sp	Este artigo apresenta uma análise abrangente de diversas espécies de	Artigo não demonstra nenhuma ênfase em qualquer cultura agrícola	Lira (2011)

visando obtenção de biocombustíveis	microalgas, como por exemplo, <i>Chlorella</i> sp., <i>Spirulina</i> spp., <i>Chlorella beyerinck</i> , <i>Arthrospira stizenberger</i> , <i>Phaeodactylum tricornutum</i> , <i>Dunaliella primolecta</i> , <i>Monallanthus saltha</i> , <i>Tetraselmis suecica</i> , <i>Isochrysis</i> sp., <i>Botryococcus braunii</i> , <i>Nitzschia</i> sp., <i>Oocystis pudilla</i> .		
Contribución de las microalgas al desarrollo de la bioeconomía	<i>Arthrospira platensis</i> , <i>Chlorella vulgaris</i> , <i>Isochrysis galbana</i> , <i>Chlorella</i> , <i>Spirulina</i> , <i>Dunaliella</i> e <i>Haematococcus</i> .	Artigo não demonstra nenhuma ênfase em qualquer cultura agrícola	Acién Fernández et al. (2018)
Produção de mudas de cultivares de mamoeiro produzidas sob doses de <i>spirulina platensis</i>	<i>Spirulina platensis</i>	Mamoeiro (<i>Carica papaya</i> L.)	Guedes (2018)
Producción de biofertilizantes a partir de microalgas	<i>Nostoc</i> sp., <i>Anabaena doliolum</i> , <i>Westiellopsis</i> sp., <i>Chlorella minutissima</i> , <i>Scendesmus</i> sp., <i>Nannochloropsis</i> sp.	Artigo não demonstra nenhuma ênfase em qualquer cultura agrícola	Collahuazo-Reinoso et al. (2019)
Chlorella, un potencial biofertilizante?	<i>Chlorella sorokiniana</i> , <i>Chlorella pyrenoidosa</i> , <i>Chlorella</i> sp., <i>Chlorella vulgaris</i>	Artigo não demonstra nenhuma ênfase em qualquer cultura agrícola	Ortiz-Moreno et al. (2019)
Avaliação da biomassa de microalgas cultivadas em água residual em vista à produção de biofertilizante para a agricultura familiar	O artigo não apresenta com clareza a espécie de microalga que foi utilizada	Artigo não demonstra nenhuma ênfase em qualquer cultura agrícola	Soares et al. (2019)
Biofertilizantes de microalgas: Desafios para uma produção competitiva e sustentável	<i>Chlorella</i> sp.	Artigo não demonstra nenhuma ênfase em qualquer cultura agrícola	da Silva et al. (2019)

<p>Aplicação de microalgas no solo para recuperação de nitrogênio: uma abordagem de ciclo de vida</p>	<p>Este artigo não apresenta detalhadamente a microalga que foi utilizada. Porém ele menciona <i>Chlorella</i> no artigo.</p>	<p>Artigo não demonstra nenhuma ênfase em qualquer cultura agrícola</p>	<p>De Souza et al. (2019)</p>
<p>Propuesta de un protocolo para la obtención de fertilizante orgánico a partir de microalgas</p>	<p><i>Chlorella</i> sp., <i>Scenedesmus</i> sp.</p>	<p>Artigo não demonstra nenhuma ênfase em qualquer cultura agrícola</p>	<p>Gonzalo et al. (2020)</p>
<p>Biodigestor anaeróbico na agricultura familiar: produção de biogás e biofertilizante a partir de resíduos pecuários e implantação de cultivo de microalgas</p>	<p><i>Monoraphidium contortum</i>, <i>Golenkinia radiata</i>, <i>Chlorella</i> sp.</p>	<p>Artigo não demonstra nenhuma ênfase em qualquer cultura agrícola</p>	<p>De Lira et al. (2021)</p>
<p>Uso de Microalgas como Bioestimuladoras da Germinação de Sementes</p>	<p><i>Arthrospira platensis</i>, <i>Chlorella vulgaris</i>, <i>Isochrysis galbana</i>, <i>Nannochloropsis gaditana</i> (= <i>Microchloropsis gaditana</i>), <i>Porphyridium cruentum</i> (= <i>P. purpureum</i>), <i>Scenedesmus</i>, <i>Arthrospira platensis</i>, <i>Chlorella vulgaris</i>, <i>Isochrysis galbana</i>, <i>Nannochloropsis gaditana</i> (= <i>Microchloropsis gaditana</i>), <i>Porphyridium cruentum</i> (= <i>P. purpureum</i>), <i>Scenedesmus acuminatus</i> (= <i>Tetradasmus lagerheimii</i>) e <i>Tetraselmis suecica</i> na germinação de sementes de agrião (<i>Lepidium sativum</i> L.)</p>	<p>Artigo não demonstra nenhuma ênfase em qualquer cultura agrícola</p>	<p>Araújo et al. (2022)</p>
<p>Uso da biomassa de microalgas cultivadas em águas residuárias da bovinocultura para produção de rúcula (<i>Eruca vesicaria</i> (L.) Cav.)</p>	<p><i>Eruca vesicaria</i> (L.) Cav.</p>	<p>Artigo não demonstra nenhuma ênfase em qualquer cultura agrícola</p>	<p>Dagnaisser (2023)</p>

<p>Estudo do uso de microalgas na agricultura com ênfase em biofertilizantes</p>	<p><i>Chlorella</i>, <i>Scenedesmus</i> sp., <i>Arthrospira platensis</i> (<i>Spirulina</i>), <i>Dunaliell</i>, <i>Chlamydomonas</i>, <i>Vicia faba</i>, <i>Tetradismus obliquus</i>, <i>Chlorococcum</i>, <i>Micractinium</i>, <i>Porphorydium</i> sp., <i>Desmodesmus</i>, <i>Botryococcus</i>, <i>Acutodesmus</i></p>	<p>Artigo não demonstra nenhuma ênfase em qualquer cultura agrícola</p>	<p>Ferreira et al. (2023)</p>
<p>Avaliação da produção de biomassa de microalgas em meios alternativos e sua utilização como bioestimulante vegetal</p>	<p><i>Chlorella vulgaris</i>, <i>Scenedesmus ecornis</i>, <i>Spirulina platensis</i>, <i>Spirulina labyrinthiformis</i></p>	<p>Artigo não demonstra nenhuma ênfase em qualquer cultura agrícola</p>	<p>Bignon et al. (2023)</p>
<p>Aplicação da biomassa da microalga <i>Chlorella</i> sp. como biofertilizante no cultivo de <i>Raphanus sativus</i> L.</p>	<p><i>Chlorella</i> sp., <i>Raphanus sativus</i> L.</p>	<p>Artigo não demonstra nenhuma ênfase em qualquer cultura agrícola</p>	<p>Albuquerque et al. (2024)</p>
<p>Biofertilizante à base de microalgas testado na germinação de sementes de <i>Lactuca sativa</i> l. (alface-americana)</p>	<p><i>Lactuca sativa</i> L.</p>	<p>Alface-americana</p>	<p>Oliveira et al. (2024)</p>
<p>Biofertilizante a partir de <i>Chlorella vulgaris</i></p>	<p><i>Chlorella vulgaris</i></p>	<p>Artigo não demonstra nenhuma ênfase em qualquer cultura agrícola</p>	<p>Torres et al. (2024)</p>
<p>Microalgas (<i>Chlorella sorokiniana</i>) no tratamento de sementes de soja: inoculação e coinoculação</p>	<p><i>Chlorella sorokiniana</i></p>	<p>Artigo não demonstra nenhuma ênfase em qualquer cultura agrícola</p>	<p>Barbosa et al. (2024)</p>
<p>Evaluación del potencial biofertilizante y bioestimulante de biomasa de microalgas cultivadas en agua residual urbana.</p>	<p><i>Scenedesmus</i></p>	<p>Artigo não demonstra nenhuma ênfase em qualquer cultura agrícola</p>	<p>Cabral et al. (2024)</p>

--	--	--	--

5 RESULTADOS

A procura atual por bioestimulantes vegetais decorre da exigência de elevar a produtividade e a qualidade agrícola, concomitantemente com a adoção crescente de métodos de cultivo sustentáveis e tecnologicamente avançados, orientados à minimização de danos ecológicos. Paralelamente, constata-se uma expansão significativa no mercado global de insumos agrícolas derivados de fontes biológicas, indicativo de uma reorientação paradigmática em direção a sistemas produtivos que harmonizam eficiência agrônômica com princípios de menor pegada ambiental e eco compatibilidade. (RUPAWALLA *et al.*, 2022).

As microalgas desempenham um papel fundamental como uma das principais fontes de fixação biológica de nitrogênio atmosférico, convertendo-o em formas biodisponíveis, como o íon amônio, essencial para o metabolismo e crescimento vegetal. Adicionalmente, a mucilagem presente na parede celular de clorófitas e cianófitas facilita a concentração e mobilização de macro e micronutrientes, bem como de íons, os quais são posteriormente disponibilizados ao solo e às plantas por meio de processos como exsudação, autólise e decomposição microbiana (ZHUANG *et al.*, 2014).

Cabe ressaltar que um número reduzido de artigos foi selecionado, uma vez que a maior parte das publicações analisadas não continham informações relevantes e precisas. No caso, informações referentes a aplicações de biofertilizantes de microalgas em experimentos científicos para poder ajudar no desenvolvimento desse projeto. Essa lacuna metodológica limitou a inclusão de um volume mais expressivo de trabalhos na revisão. A maioria dos artigos científicos utilizados como estudo são revisões bibliográficas, e os demais, artigos científicos únicos e publicados.

Dentre os estudos selecionados no presente artigo técnico, Lira (2011) desenvolve seu artigo usando como referência cerca de 5 artigos científicos fazendo alusão a produção, aos meios de cultivos, na composição química e nas principais atividades industriais que a microalga *Chlorella* sp. Pode oferecer. Começando pelo primeiro artigo do projeto, denominado: Cultivo e aplicações de microalgas e de seus principais derivados. Nesse artigo, o autor comenta vários aspectos referentes as microalgas no geral, como por exemplo, o que são as microalgas, no qual é descrito que as microalgas são organismos pequenos, unicelulares, podendo variar, dependendo das espécies envolvidas, a organismos pluricelulares. Além de serem consideradas plantas simples, sendo algumas consideradas muito próximas a plantas mais

complexas. O autor comenta brevemente também sobre os principais meios de cultivos das microalgas, destacando dois principais cultivos: o cultivo natural e o cultivo em fotobiorreatores. É comentado também sobre suas principais funções biotecnológicas, no qual é destacado o processo de aquicultura e o processo de produção de alimentos. O artigo ainda apresenta e descreve um pouco dos componentes que são encontrados nas microalgas, como por exemplo, os carotenoides e os ácidos graxos. Para concluir o resumo do artigo, o autor comenta sobre a evidente necessidade de estudos e pesquisas envolvendo a produção de microalgas no Brasil, e como sua atividade comercial é importante para o desenvolvimento de mercados específicos como este das microalgas.

O segundo artigo estudado é denominado: as microalgas como alternativa á produção de biocombústiveis. O artigo se inicia comentando sobre a origem das microalgas na produção de biocombústiveis, que foi na década de 1950, no MIT. O artigo continua descrevendo um pouco sobre como as microalgas são produzidas. As microalgas utilizam a energia solar para converter água e CO₂ em biomassa. São organismos fotossintetizantes que utilizam o ambiente aquático para poderem se desenvolver. De acordo com o artigo, as microalgas possuem um valor “mais baixo” para a produção de biocombústível em relação ao método convencional da produção via combustível fóssil (Petróleo). Um exemplo encontrado no artigo, é os dados da empresa Valcent Products Inc. Que desenvolveu biorreatores verticais de alta densidade, e conseguiu a a produção de cerca de 150.000 galões ao ano (cerca de 1,5 milhões de galões ao ano).

Ainda é mencionado sobre outros sistemas de cultivos de microalgas, como o sistema aberto e o sistema fechado.

Nas considerações finais é mencionado que a produção de biocombústível usando as microalgas é extremamente inovador e sua evolução depende das grandes empresas inovadoras produtoras de biocombústiveis. Apesar de ser uma tarefa considerada nova, ela vem ganhando cada vez mais atenção, investimento e estudos. É nítido que a produção de biocombústiveis através das microalgas se tornou uma alternativa bem mais sustentável e limpa em relação a produção de combustíveis fósseis, e a tendência é que, daqui a alguns anos, essa prática substitua totalmente o método tradicional de produção de combustível no mundo todo.

O terceiro artigo é denominado: Efeito do meio de cultivo no rendimento e na composição bioquímica da biomassa da microalga nativa *Chlorella* sp. visando a produção de biocombústiveis. Esse artigo se utiliza da microalga *Chlorella* sp. para usá-la como fonte para a produção de biocombústível através da sua biomassa. A *Chlorella* sp. utilizada no experimento do artigo foi coletada nos reservatórios da Piscicultura da Universidade Federal de

Viçosa e isolada no laboratório de Ficologia da mesma Instituição. O cultivo da *Chlorella* sp. foi feito utilizando o Método Watanabe (WATANABE, 1960), que consiste em 1,25 g L⁻¹ de KNO₃, 1,25 g L⁻¹ de KH₂PO₄, 20 mg L⁻¹ de MgSO₄, 20 mg L⁻¹ de FeSO₄ e 1 mL L⁻¹ de solução A5 (OH-HAMA, 1988); e com o meio com baixo teor (50%) de nitrogênio, que consiste em 203 mg L⁻¹ de (NH₄)₂HPO₄, 2,236 g L⁻¹ de KCl, 2,465 g L⁻¹ de MgSO₄, 1,361 g L⁻¹ de KH₂PO₄ e 10 mg L⁻¹ de FeSO₄. O meio teve o valor do pH fixado em 6 (ILLman, 2000). Os cultivos foram feitos em fotobiorreatores.

O artigo ainda comenta referente a avaliação de crescimento das microalgas, a obtenção de biomassa liofilizada, utilizando o processo de centrifugação, além de comentar sobre as biomassas secas, proteínas Hidrossolúveis, rompimento celular, carboidratos totais, lipídios totais, delineamento Experimental e Análise Estatística.

O artigo conclui argumentando que a suplementação de CO₂ ao meio de cultivo proporcionou uma maior densidade celular e produtividade nas culturas de *Chlorella* sp. Mas que, não influenciou nos carboidratos, proteínas e nem nos lipídios das algas. Analisando a possível utilização dos lipídios da *Chlorella* sp. Como matéria prima para a produção de biodiesel, é necessário a utilização de um meio de cultivo com uma suplementação de CO₂ e com supressão de conteúdo de nitrogênio.

O quarto artigo denominado: Comportamento reológico de suspensões da microalga nativa *Chlorella* sp. esclarece questões referentes ao comportamento de reológico de suspensões em diferentes tempos de cultivos da microalga nativa *Chlorella* sp. No qual o artigo descreve em seu referencial teórico, um pouco sobre como o termo reologia foi empregado pela primeira vez, e quais são seus principais usos. As medidas reológicas utilizadas foram feitas através de um reômetro rotacional. No qual, o seu procedimento de medida consiste em ajustar a velocidade de rotação para o cilindro interno. Além disso, é medido o valor do torque correspondente para cada velocidade de rotação. Nesse modelo, os determinados valores de torque e de velocidade rotacional são transformados, respectivamente, em tensão de cisalhamento e taxa de deformação. Após a obtenção das curvas de tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação é possível calcular a viscosidade das soluções por meio de uma análise de regressão.

As culturas de microalgas foram inseridas no cilindro de reômetro, e mantendo a temperatura constante, as leituras do torque foram registradas. Foram registradas rotações que se situaram na faixa de (0,1 a 350) rpm. O principal objetivo desse estudo foi analisar o comportamento reológico do cultivo da *Chlorella* sp. em meio Watanabe.

O artigo conclui que o comportamento reológico da *Chlorella* sp. em meio Watanabe

e com baixo teor de nitrogênio, mostra-se com características dilatante, no qual foi observado um aumento na viscosidade no cultivo da *Chlorella* sp., onde pode-se observar também um breve aumento na densidade relativa média. Já o quinto artigo denominado: separação da biomassa de *Chlorella* sp. Em meio de cultivo contendo baixo teor de nitrogênio avaliou-se a sedimentação, centrifugação e a influência das condições de coagulação, que podem maximizar a remoção da biomassa de *Chlorella* sp. Em suspensão no meio de cultivo contendo baixo teor de nitrogênio. Para fazer a análise da sedimentação, foi utilizado o ensaio em coluna de sedimentação de acrílico, de 100 mm de diâmetro e 1,00 m de altura. O preenchimento da coluna com a cultura da *Chlorella* sp. Foi feito para manter a concentração de sólidos suspensos. O resultado dessa sedimentação foi a seguinte equação: $\text{Conc.} = 0,4283\text{abs} - 0,0181$, em que: Conc. = concentração de biomassa da *Chlorella* sp. Em meio contendo baixo teor de nitrogênio e abs = Absorbância a 670 nm.

O processo de centrifugação foi feito na centrífuga "SIGMA 3-18K", no qual foram testados 5 tipos de rotação em 5 períodos diferentes. A média de volume concentrado, em cada rotação, foi utilizada no levantamento da curva de Bio-sólito total (BST), em razão do período de centrifugação utilizado, gerando uma família com cinco curvas, demonstrando o volume concentrado em cada rotação em função do tempo.

O artigo ainda mostra um pouco dos resultados em formato de tabela e esclarece alguns pontos referentes a questão da sedimentação e da centrifugação. Além de, mostrar alguns outros processos, como por exemplo, a floculação.

Para concluir, o autor esclarece que o processo de sedimentação se mostrou inadequado para a separação da *Chlorella* sp. Já o processo de centrifugação a 600 g foi capaz de separar mais de 90% das células da *Chlorella* sp. Em cerca de 5 minutos. No qual, a redução na velocidade de rotação da centrífuga implicou em um consumo de energia menor, podendo até a ser implementada em alguns processos de produção de microalga.

Acién Fernández., (2018) relata sobre como as microalgas possuem o poder de melhorar a sustentabilidade humana e as atividades econômicas. No qual, o autor destaca como as microalgas podem se adaptar a qualquer ambiente, seja ele um ambiente limpo, quanto um ambiente insalubre, tornando-as extremamente versáteis para a produção de produtos e serviços que podem ser obtidos através de suas biomassas e extração de óleos. No artigo, é bastante comentado sobre a produção das microalgas, seja através da quantidade de luz (artificial ou natural, seja pela produção de nutrientes (podendo citar o carbono, o nitrogênio e o fósforo por exemplo), seja pelos fotobiorreatores.

A utilização das microalgas na economia pode ser, de acordo com o autor, dividida em

quatro principais pontos: a produção de energia, principalmente os biocombustíveis; Obtenção de bioplásticos e produtos para a agricultura, como os bioestimulantes e os biopesticidas; produção de rações para a aquicultura e animais; e obtenção de produtos de consumo humano, destacando-se alimentos e nutracêuticos, além de cosméticos e produtos farmacêuticos.

O autor conclui que as microalgas podem contribuir significativamente para a bioeconomia, pois podem melhorar a sustentabilidade dos múltiplos processos relacionados a atividades humanas, desde a produção de alimentos até o tratamento de águas residenciais. Os diversos estudos e projetos que estão sendo publicados mostrando a versatilidade de produção das microalgas, está permitindo o desenvolvimento de processos de produção industrial para ajudar a contribuir em outros setores. Em um curto prazo, espera-se que o desenvolvimento de novas tecnologias e melhorias nos sistemas de produção, podem ajudar a mitigar a crescente escassez de alimentos no mundo, permitindo o cultivo de certos tipos de alimentos sem ter a necessidade de um solo fértil.

Guedes (2018) estuda e disserta sobre o desenvolvimento de mudas de mamoeiro (*Carica papaya* L.) utilizando biofertilizantes na sua produção, tornando um processo de produção muito mais sustentável e muito mais ecológico. O autor comenta sobre como o mamoeiro é importante para a economia brasileira; sobre como a biomassa das microalgas são importantes para a produção de vários produtos ecológicos, como os bioestimulantes e biofertilizantes.

De acordo com o autor, a aplicação de *Spirulina platensis* via solo, ao longo do tempo, em mudas de mamoeiro do híbrido Tainung-1 (pertencente ao grupo 'Formosa') e do cultivar Sunrise Solo (grupo 'Papaya'), exercem influência positiva sobre o desenvolvimento vegetal. As doses entre 0,4% e 1,6% de *Spirulina platensis* promoveram os melhores resultados nas seguintes variáveis: número de folhas, altura das plantas, diâmetro do caule, área foliar, comprimento radicular, massa fresca (parte aérea, radicular e total), massa seca (parte aérea, radicular e total), relação raiz/parte aérea e Índice de Qualidade de Dickson.

É descrito no artigo a importância do estudo de microalgas para a produção de novos insumos ecológicos, principalmente devido à falta de artigos publicados.

Uma das principais microalgas usadas comercialmente é a *Spirulina platensis*, pois possui muitos compostos orgânicos e inorgânicos que indicam que, essa espécie específica de microalga, possui um grande potencial para se tornar um biofertilizante de extrema qualidade. Alguns experimentos foram feitos pelo autor para mostrar a eficácia da *Spirulina platensis* no aumento na produção do mamoeiro (*Carica papaya* L.). Um dos experimentos foi feito sem a utilização da microalga *Spirulina platensis* e o outro experimento, foi feito com a presença da microalga. Foram avaliados alguns fatores importantes nos experimentos, como número de

folhas, índice de velocidade de emergência (IVE), porcentagem de emergência (PE), área foliar, entre outros fatores analisados.

Os resultados dos experimentos indicam que as mudas com concentração de *Spirulina platensis* tiveram um aumento significativo em alguns fatores, como o aumento no diâmetro do caule, um aumento na altura das plantas. Esse aumento foi na concentração de 0,4% a 2,0% de *Spirulina platensis* inserida nas mudas.

Para concluir, o autor comenta que a imersão das sementes em *Spirulina platensis* não afetou a velocidade ou porcentagem de emergência. Entretanto, em mudas de mamoeiro ‘formosa’ e ‘papaya’, a aplicação contínua (0,4–1,6%) melhorou o desenvolvimento vegetal. A dose de 2,0% aumentou o acúmulo de N na massa seca foliar, enquanto o tratamento controle apresentou maiores teores de P.

Collahuazo-Reinoso et al. (2019) analisaram as principais propriedades e a produção de microalgas em biofertilizantes. No qual, comentam sobre como os biofertilizantes são produzidos através de formulações de microorganismos vivos, solubilizando o fosforo inorgânico e incrementando no rendimento de certos tipos de cultivos. Além de serem extremamente eficazes no crescimento de microalgas e na questão da sustentabilidade. Comentam sobre os vários tipos de microalgas utilizadas na produção de biofertilizantes orgânicos. Desde *Chlorella minutissima*, passando por *Scenedesmus* sp., chegando até *Nannochloropsis* sp. Ainda de acordo

Collahuazo-Reinoso et al. (2019) concluem dizendo que a biotecnologia implementada pelos biofertilizantes, podem ser de extrema importância para ajudar na redução de poluentes e no impacto ambiental, causado pelos fertilizantes sintéticos mais utilizados. Além de os biofertilizantes derivados de microalgas serem extremamente mais sustentáveis, podem ser usados em larga escala sem prejudicar o meio ambiente, sendo uma alternativa orgânica mais viável e sem a utilização de agroquímicos prejudiciais.

Ortiz-Moreno et al. (2019) dissertaram sobre como as microalgas apresentam vantagens únicas, sendo extremamente fácil de cultivar, além de ter baixos custos de crescimento e capacidade de adaptação a diferentes tipos de ambientes. Os autores focaram na microalga *Chlorella* sp. Como principal microalga para poderem idealizar o trabalho. Além do que, as microalgas (deram destaque principal para a *Chlorella* sp.) podem ser utilizadas em diversas áreas e de vários modelos, como na parte comercial nos alimentos humanos, na área da beleza (pele, produtos cosméticos), na parte de rações de animais terrestres e aquáticos, indústrias biomédicas e farmacêuticas para a síntese de anti-inflamatórios, e como alternativa para a sustentabilidade na agricultura, através, por exemplo, dos biofertilizantes.

Os autores ainda comentam sobre as características das microalgas e sobre sua utilização, tanto na parte do solo, no qual as microalgas atuam como biorreguladores de crescimento, como hormônios, vitaminas, açúcares. Atuam também como atividades antipatogênicas e atividades antioxidante.

Os autores explicam um pouco sobre a microalga *Chlorella* sp. e como ela tem sido a mais utilizada para o processo de biofertilização, além de ser a primeira microalga utilizada para tal procedimento. A *Chlorella* sp. possui grande quantidade de macro e micronutrientes, podendo ser destacado as proteínas e os carboidratos.

Ortiz-Moreno *et al.* (2019) concluem dizendo que em todos os cenários testado nos experimentos, a microalga *Chlorella* sp. foi eficaz e teve resultados positivos. Nesse caso, os biofertilizantes dessa microalga podem ajudar a fornecer um suplemento adequado aos fertilizantes químicos, fazendo com que a agricultura orgânica cresça cada vez mais, garantindo a produção de alimentos de qualidade para os seres humanos.

Soares *et al.* (2019) buscam apresentar o enorme potencial que as microalgas possuem como biofertilizantes para as práticas de pequenos agricultores familiar, podendo assim, viabilizar o seu desenvolvimento econômico enquanto trabalhador rural. Os autores mostram um pouco de como fizeram a coleta das microalgas. No qual, utilizaram várias garrafas âmbar de 4 litros para fazer a coleta, e comentam sobre como foram feitos os meios de cultivos dessas microalgas coletadas, além de mostrarem quanto tempo ficaram no biorreator, entre outros métodos e práticas utilizados por eles.

Soares *et al.* (2019) apresentaram alguns resultados bem interessantes. Durante seu processo de crescimento, as microalgas requerem compostos nitrogenados, como nitrito e nitrato, além de fosfato, para seu desenvolvimento metabólico. Na ausência de amônia, observa-se que as microalgas metabolizam o nitrito, convertendo-o em nitrato através de processos bioquímicos. Os autores analisaram dois tratamentos distintos. Sendo que, no primeiro, foi possível notar o aumento do nitrato e o consumo do nitrito, no qual o fosfato apresenta um leve aumento no tratamento. Já no tratamento dois, observou-se um decréscimo progressivo na concentração de nitrito ao longo do cultivo, concomitantemente com um incremento nos teores de nitrato, o qual apresentou correlação temporal com a fase logarítmica de crescimento da clorofila a. Esse padrão fenotípico resulta do processo de conversão metabólica de nitrito em nitrato mediado pela atividade microalgal. Paralelamente, a concentração de fosfato exibiu seu pico de acumulação durante a fase logarítmica de produção de clorofila a, seguido por uma redução progressiva que acompanhou a fase de declínio do pigmento fotossintético.

Os autores concluem mostrando que certas evidências demonstram que biofertilizantes

microalgais, produzidos a partir do tratamento de águas residuais, representam uma alternativa sustentável aos fertilizantes químicos. Estes últimos, embora atendam à demanda agrícola global, causam degradação do solo, poluição hídrica, emissões de CO₂ e riscos à saúde humana.

A biomassa microalgal requer caracterização de nutrientes e metais tóxicos, seguida por digestão anaeróbica.

Ou seja, após otimizações, os biofertilizantes microalgais apresentam viabilidade técnica, econômica e ambiental, particularmente para agricultura familiar, combinando benefícios agronômicos com sustentabilidade.

Da Silva *et al.* (2019) fazem uma revisão bibliográfica que pretende verificar a utilização de microalga como matéria-prima de biofertilizante no Brasil e no Mundo. A análise dos dados coletados fundamenta-se nos seguintes parâmetros: nacionalidade da patente e seu campo de aplicação, temporalidade do registro, autoria das invenções, códigos de classificação internacional, além das entidades corporativas e acadêmicas com maior volume de registros patentários.

Os autores fizeram uma verificação dos dados coletados, ou seja, num intervalo entre os anos de 2007 e 2018, observou-se muitas pesquisas bibliográficas encontradas, podendo ser destacados os anos de 2013 a 2017 como os anos mais foram feitas pesquisas. No qual, foram associados a três palavras-chaves principais: microalgae, biofertilizer e agriculture.

Em contraste, o volume de registros patentários no mesmo período e com os mesmos descritores temáticos mostrou-se reduzido. Tal evidência permite inferir que, embora exista significativa produção científica sobre o tema, observa-se uma lacuna na transferência desse conhecimento para o mercado, com escassa disponibilidade de produtos comercializáveis.

O presente artigo é concluído reiterando a importância das microalgas para o setor agrícola, e que os biofertilizantes à base de microalgas mostraram benefícios significativos no desenvolvimento da agricultura hortícola.

Em resumo, o desenvolvimento e implementação de bioprodutos derivados de microalgas apresentam um elevado potencial para suprir as demandas da agricultura sustentável, contemplando simultaneamente os três pilares da sustentabilidade: a preservação ambiental, a viabilidade econômica e a justiça socioeconômica.

DE SOUZA *et al.* (2019) se baseia em uma pesquisa (Aplicação de Microalgas no Solo para Recuperação de Nitrogênio: uma abordagem de ciclo de vida) que faz parte integrante do projeto denominado “Biofilme de microalgas: tecnologia inovadora para mitigação das mudanças climáticas e desenvolvimento sustentável no setor agropecuário”, que foi aprovado em 2013. O presente artigo examina os efeitos ambientais associados a todo o ciclo de utilização

de microalgas como biofertilizantes, abrangendo desde sua produção até a aplicação no solo, destacando os principais obstáculos inerentes a esse processo e possíveis alternativas menos impactantes sob a perspectiva da análise de ciclo de vida (ACV).

A pesquisa aborda alguns benefícios essenciais das microalgas como biofertilizantes para o meio ambiente, porém a pesquisa também aborda a questão de incerteza em relação a produção e o manejo das microalgas em relação a certos impactos ambientais negativos. Por isso, a pesquisa tem como principal objetivo utilizar um procedimento denominado análise de ciclo de vida (ACV) para avaliar e contabilizar o verdadeiro impacto da produção de microalgas. Para a avaliação do ciclo da vida e da gestão ambiente, a presente pesquisa utilizou um software denominado SimaPro. Além de que, o presente estudo teve como um de seus objetivos, quantificar e avaliar os impactos ambientais associados às etapas de produção, colheita e aplicação de biomassa microalgal utilizada como fertilizante nitrogenado no cultivo de milho (*Pennisetum glaucum*), comparando-os com os impactos decorrentes do uso de um fertilizante mineral convencional (ureia).

De acordo com o autor da pesquisa, foi utilizado para o cultivo das microalgas uma lagoa de algas de alta taxa (HRAP). No qual foi usado um efluente para fazer o cultivo das microalgas. Um sistema de injeção de CO₂ também foi usado para controlar o pH da lagoa, mantendo-o entre 7 e 8, proporcionando assim maior produtividade e recuperação de N. Todo o experimento, foi realizado no prazo de 60 dias no inverno.

Os aspectos metodológicos e de resultados foram limitados ao estudo de LCA. Em cada ciclo operacional, foram obtidos 0,85 g/L de nitrogênio total Kjeldahl e um volume de 55 L de biomassa colhida. Consequentemente, constatou-se a necessidade de 22,99 operações para a produção de 1 kg de nitrogênio – unidade funcional adotada para a avaliação do ciclo de vida (ACV). A duração de cada operação foi estabelecida em 14 dias, período correspondente ao declínio do crescimento algal, determinado por meio de monitoramento diário da concentração de clorofila.

Para a quantificação dos impactos ambientais, foram associadas três etapas do processo analisado (cultivo da biomassa, colheita e aplicação no solo), no qual empregou-se o software SimaPro, versão 8.1.

Foi realizado na pesquisa uma análise de ciclo de vida (ACV) mediante a aplicação da metodologia ReCiPe de ponto médio, a qual se concentra em aspectos ambientais, configurando-se, portanto, como a abordagem metodológica mais adequada para a presente investigação (PRÉ, 2013). O enfoque em pontos médios foi adotado com o propósito de hierarquizar, de maneira sistemática, os impactos de natureza imediata e intermediária. A

referida metodologia contempla 18 categorias de impacto, das quais algumas, como ecotoxicidade marinha e radiação ionizante, foram excluídas por não apresentarem relevância frequente em estudos de avaliação ambiental associados ao tratamento de efluentes e recuperação energética. As categorias selecionadas para este estudo foram alterações climáticas, acidificação do solo, eutrofização de água doce, toxicidade humana, ecotoxicidade terrestre e formação de material particulado. Em que foram criteriosamente eleitas em virtude de sua suscetibilidade a efeitos diretos nas fases analisadas do processo.

Para tentar minimizar os impactos ambientais, foi proposto um cenário com algumas alternativas sustentáveis, podendo ser destacada a questão da energia fotovoltaica como sendo uma fonte alternativa, ao invés da energia hidrelétrica. Apesar de amplamente reconhecidas como fonte renovável de energia, as usinas hidrelétricas apresentam uma gama significativa de impactos ambientais. Diante disso, propôs-se um cenário alternativo no qual toda a energia demandada nas etapas de produção e colheita da biomassa de microalgas – incluindo o suprimento energético para as rodas de pás, a recirculação do efluente na coluna de carbonatação e a agitação pós-aplicação do coagulante – fosse proveniente de fonte fotovoltaica.

A pesquisa possui algumas tabelas que demonstram alguns aspectos importantes do experimento, podendo-se dar destaque para três: tabela 1, tabela 4 e tabela 5. No qual, a tabela 1 demonstra que o crescimento das microalgas pode ter sido mais lento devido a inserção de um efluente primário. Já nas tabelas 4 e 5, foi possível analisar que os valores de energia elétrica, coagulante e de CO₂ foram bem altos para se produzir 1 kg de Nitrogênio, a partir da biomassa das microalgas analisadas.

Existem pontos a serem comparados e analisados na pesquisa, podendo ser destacado como importante, a comparação do impacto entre o uso de biofertilizantes e da ureia. Os resultados demonstraram que o fertilizante convencional apresentou impactos significativamente inferiores em comparação ao biofertilizante derivado de microalgas, com exceção dos indicadores de acidificação do solo e ecotoxicidade em ecossistemas aquáticos dulcícolas.

Na reta final da pesquisa, é descrito que embora tenha sido descrito alguns impactos específicos dos fertilizantes, deve-se ser ressaltado que a ureia ainda é um fertilizante bem popular no mercado, enquanto os biofertilizantes representam uma tecnologia relativamente nova. Por esse e outros motivos, como a questão da coleta de biomassa, a composição da biomassa (que pode ser influenciada por algum tipo de efluente), e outros fatores, tem que ser cada vez mais estudados e terem uma visibilidade da comunidade internacional e nacional cada

vez maior e mais ativa para poder desenvolver produtos de qualidade primária para ajudar na sustentabilidade do meio ambiente.

A pesquisa conclui exaltando que, a principal contribuição dessa pesquisa é avaliar o potencial do biofertilizante de microalgas e utilizar a ferramenta de LCA para identificar as principais questões abordadas. Esses resultados podem fundamentar o desenvolvimento de novas tecnologias, potencializando sua viabilidade econômica e competitividade frente aos fertilizantes tradicionais.

Gonzalo et al. (2020) salientam a importância dos biofertilizantes para a questão da sustentabilidade e da biodiversidade, dando exemplos de algumas microalgas que são ótimas fontes para a produção de biofertilizantes, como a *Chlorella* sp. e *Scenedesmus* sp. Os autores ainda comentam sobre os principais benefícios que o uso de biofertilizantes podem ter, como por exemplo, fornecer melhores condições físicas e nutricionais para o desenvolvimento da planta, permitindo assim, a obtenção de culturas mais produtivas de plantas, em comparação com a utilização de fertilizantes sintéticos, que afetam muito a qualidade de vida e crescimento da planta.

As microalgas coletadas pelos autores da pesquisa (*Chlorella* sp. e *Scenedesmus* sp.) foram adquiridas em áreas adjacentes a cursos de água, rios e lagos. No qual, foram colocadas em um recipiente esterilizado e deixado descansar por 72 horas em temperatura ambiente. Depois desse tempo, essas amostras foram visualizadas em um microscópio óptico e foi concluído, que eram amostras de *Chlorella* sp. E de *Scenedesmus* sp.

Para estimar o potencial de oferta de nutrientes provenientes de biofertilizantes à base das microalgas *Chlorella* sp. e *Scenedesmus* sp., foram quantificados os teores de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S) e micronutrientes (B, Zn, Cu, Fe e Mn), bem como avaliados os riscos de salinização, por meio da condutividade elétrica. No qual, foi feita uma tabela. Nessa tabela, podemos destacar que a quantidade de nitrogênio e fósforo encontradas são inferiores em comparação a de dois outros autores mencionados na pesquisa: Uysal *et al.* (2015) e (Tüzel *et al.* 2016), que, no caso, foram encontrados os valores de 1,0. 057 e 0,99% respectivamente.

Quanto aos micronutrientes presentes no meio de cultura ou no biofertilizante de microalgas – conforme demonstrado na Tabela 1 –, a aplicação foliar pode constituir uma alternativa viável, uma vez que estudos indicam a baixa eficiência de aplicações edáficas, em decorrência das limitações físico-químicas do solo.

Diante das vantagens nutricionais, de segurança e custo-efetividade dos biofertilizantes à base de microalgas, este estudo propõe um protocolo otimizado para aplicação em escala

comercial, adaptado às condições de produtores rurais latino-americanos. Para tal, foram estabelecidos critérios de seleção baseados em parâmetros de viabilidade técnica, escalabilidade e compatibilidade com infraestruturas locais. Com base em revisão sistemática, avalia-se a eficácia de cada etapa do processo, superando as limitações de métodos laboratoriais convencionais e visando sua validação em condições reais de campo.

Gonzalo *et al.* (2020) dissertam e dão algumas instruções bem detalhadas ainda sobre o preparo do meio de cultura das microalgas para a produção do biofertilizante, destacando algumas técnicas, como a preparação, a massificação, a escalada, entre outras técnicas abordadas pelos autores na pesquisa.

Os autores concluem dizendo que apesar das concentrações reduzidas de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg, S) e micronutrientes (B, Zn, Cu, Fe, Mn) em biofertilizantes à base de *Chlorella* sp. e *Scenedesmus* sp. comparados a fertilizantes comerciais, sua eficácia é potencializada pela alta biodisponibilidade de nutrientes, que favorece a absorção estomática e cuticular. Essa característica permite a substituição parcial de fertilizantes químicos, cuja eficiência é comprometida por fatores edáficos.

O protocolo proposto para propagação, isolamento e escalonamento viabilizaria aplicações em pequena escala (ex.: fertirrigação em cultivos protegidos), embora requeira validação prática. Contudo, o elevado índice de condutividade elétrica restringe seu uso em solos alcalinos ou culturas sensíveis à salinidade, limitando expansões em larga escala.

DE LIRA *et al.* (2021) começa seu artigo dando ênfase a como os estudos envolvendo energias limpas vem aumentando, principalmente devido ao fato que, as energias não renováveis, como gás, carvão e petróleo não podem ser reaproveitadas e estão, cada vez mais, se tornando escassas a cada ano. O autor comenta também sobre um enorme problema ambiental que vem sendo agravado atualmente, que no caso, é a questão do descarte de resíduos agropecuários em corpos hídricos, principalmente dejetos de suínos e aves.

A biomassa (no caso, estercos de suínos e de aves) pode ser utilizada como energia renovável e sustentável (o biogás) através de um biodigestor, que produz além do biogás, um bioestimulante que pode ser utilizado em várias culturas alimentares.

Os efluentes provenientes de biodigestores de dejetos agropecuários, denominados biofertilizantes, podem constituir um substrato eficaz para o cultivo de microalgas, devido à sua elevada concentração de macronutrientes essenciais, notadamente nitrogênio, fósforo e potássio.

De acordo com o autor, os biodigestores consistem em sistemas projetados para otimizar a decomposição de resíduos orgânicos mediante processos anaeróbios, caracterizados pela

ausência de oxigênio atmosférico. Tais condições propiciam o estabelecimento de comunidades microbianas especializadas, as quais catalisam a biodegradação eficiente do substrato orgânico. Os biodigestores podem produzir duas matérias principais: o biogás e os biofertilizantes.

O biogás é o produto da decomposição de restos vegetais em ambientes sem a presença de oxigênio. O biogás, um combustível gasoso produzido por digestão anaeróbia de matéria orgânica, compõe-se principalmente de metano (55-70%) e CO₂ (30-45%), contendo ainda traços de H₂S, NH₃ e outros gases residuais. Este biocombustível versátil, gerado a partir de diversos substratos orgânicos, produz como coproduto um efluente rico em nutrientes, adequado para aplicação como biofertilizante.

Já o biofertilizante exibe teores médios de N (1,5-4,0%), P (1,0-5,0%) e K (0,5-3,0%), além de micronutrientes essenciais (Ca, S, Mg, B, Fe, Cu, Mn, Zn, Mo), configurando-se como substituto parcial ou complemento aos fertilizantes nitrogenados sintéticos. Seu pH ligeiramente alcalino (7,0-8,0) favorece a microbiota edáfica, promovendo a recuperação de solos degradados e o equilíbrio biogeoquímico.

Adicionalmente, seu aporte nutricional viabiliza a revitalização de áreas agrícolas e o controle fitossanitário, reduzindo custos operacionais e impactos ambientais pelo reaproveitamento de resíduos orgânicos. Ressalta-se, contudo, que sua composição nutricional é diretamente influenciada pela matriz orgânica utilizada no processo de biodigestão.

DE LIRA *et al.* (2021) utiliza para desenvolver sua pesquisa três protótipos caseiros de biodigestores, que no caso é do modelo indiano, no qual o autor se inspirou. Foram construídos mais dois biodigestores que tinham como função apenas gerar biofertilizantes, para poderem serem utilizados nas culturas das microalgas.

Para a geração de biogás, empregaram-se três unidades biodigestoras alimentadas com dejetos suíno (DS), dejetos avícolas (DA) e uma mistura binária (DS+DA). Paralelamente, para a produção de biofertilizante, utilizaram-se os mesmos três biodigestores, além de duas unidades adicionais: uma contendo DA combinado com resíduos agrícolas (RA) e outra com DS + RA.

Cada reator foi carregado com 240 L de substrato, nas seguintes proporções: Biodigestor Suíno (BS): 80 kg DS + 160 L água (razão 1:2); Biodigestor Avícola (BA): 60 kg DA + 180 L água (razão 1:3); Biodigestor Binário (BB): 53 kg DS + 106 L água (70%) + 20 kg DA + 60 L água (30%).

Para a produção exclusiva de biofertilizante: BS+RA: 30 kg DS + 60 L água (52%) + 20 kg RA + 60 L água (48%) - total 170 L; BA+RA: 20 kg DA + 60 L água (50%) + 20 kg RA + 60 L água (50%) - total 160 L.

A produção de biogás, segundo o autor, foi quantificada semanalmente medindo-se o

deslocamento vertical do gasômetro calibrado (área = 0,236 m²) durante o período de retenção hidráulica, com posterior purga do sistema através de válvula de controle.

Os resultados encontrados foram os seguintes: O volume de biogás gerado nos reatores anaeróbios foi monitorado mediante aferição do deslocamento vertical do gasômetro calibrado, cujo valor foi correlacionado com sua área de seção transversal (0,236 m²). Os períodos de retenção hidráulica estabelecidos foram de 35 dias (BA), 38 dias (BS) e 56 dias (BB), determinados em função da curva de produção específica de cada unidade.

O reator BS demonstrou maior produtividade nas três semanas iniciais, atingindo pico máximo de 1,13 m³ na terceira semana, com subsequente declínio. O BA exibiu produção máxima precoce (0,36 m³ na primeira semana), seguida de redução progressiva. Já o BB apresentou desempenho crescente, com produção ótima (0,81 m³) alcançada apenas na sexta semana.

As cepas microalgais *Monoraphidium contortum*, *Golenkinia radiata* e *Chlorella* sp. foram cultivadas sob condições controladas (fotoperíodo: 12h; iluminação: lâmpadas fluorescentes *daylight*; aeração contínua) em meio controle e em meios suplementados com biofertilizantes (1-2% v/v) provenientes dos biodigestores BS, BA e suas combinações com resíduos agrícolas (RA), acrescidos de solução NPK.

Monoraphidium contortum apresentou maior produtividade no biofertilizante BA (2% v/v), com ciclo de 11 dias até a fase estacionária, exceto no tratamento BS+RA (1% v/v) que mostrou desempenho inferior ao controle. *Golenkinia radiata* demonstrou crescimento superior ao controle apenas com BA e BA+RA (2% v/v), atingindo fase estacionária em 9 dias. *Chlorella* sp. exibiu melhor desempenho nos tratamentos com BS (2% v/v) e BS+RA (2% v/v).

Os padrões de crescimento diferenciados entre as espécies evidenciam respostas metabólicas distintas à composição química dos biofertilizantes. A eficácia dos meios alternativos foi comprovada, particularmente para *M. contortum* e *Chlorella* sp., com vantagem econômica significativa em relação aos meios convencionais.

O protocolo desenvolvido mostrou-se economicamente viável, utilizando esterilização doméstica eficaz (1h em fogão industrial) e reduzindo os custos de produção, com potencial para aplicação em larga escala como suplemento proteico para ração animal.

Esse artigo se concluí evidenciando que os sistemas biodigestores desenvolvidos demonstraram eficiência operacional otimizada, caracterizada pela ausência de vazamentos e maior captação solar devido à instalação superficial, mantendo condições mesofílicas ideais para metanogênese. Os reatores BS e BB destacaram-se na produção, gerando 3,747 m³ (71,1% CH₄) e 3,726 m³ (73,1% CH₄) respectivamente, com yields específicos de 804,8 L/kgSV

(biogás) e 572,2 L/kgSV (CH₄) para BS, e 626,0 L/kgSV (biogás) e 457,6 L/kgSV (CH₄) para BB. Notavelmente, a correção de pH incrementou em 3,3 vezes a produção no BAC (2,196 m³) comparado ao BA não ajustado (0,665 m³), evidenciando a importância do controle deste parâmetro.

As cepas selecionadas (*Monoraphidium contortum*, *Golenkinia radiata* e *Chlorella* sp.) apresentaram crescimento superior em meios alternativos à base de efluentes, comparados aos controles químicos. A espécie *M. contortum* mostrou melhor desempenho no meio BS 2% v/v, *G. radiata* no BA 2% v/v, e *C. sp.* no BS 2% v/v, comprovando a eficácia nutricional dos biofertilizantes, ricos em N, P, K, Cl⁻, SO₄²⁻ e Na⁺.

O cultivo de *Chlorella* sp. demonstrou eficiência na purificação do biogás, removendo 53,8% do CO₂ inicial (de 19,5% para 10%), com média geral de 11%, elevando o poder calorífico. Paralelamente, observou-se incremento na biomassa algal e teores de proteína total (PT), carboidratos totais (CT) e lipídios totais (LT) nos meios alternativos, com ou sem biogás.

Os resultados validam a viabilidade técnica da implantação conjunta de sistemas de produção de biogás e biomassa microalgal em propriedades rurais, particularmente para agricultura familiar, com sinergias demonstradas na valorização de resíduos e eficiência produtiva.

Araújo *et al.* (2022) se baseiam em uma revisão bibliográfica referente as metodologias e formas de aplicação das microalgas na germinação de sementes. No qual, comenta sobre as várias utilidades e aplicações biotecnológicas que as microalgas possuem, principalmente envolvendo a questão dos bioestimulantes. O trabalho utiliza como referência artigos científicos voltados para informações sobre as metodologias de aplicação de microalgas em experimentos de campo e germinação de sementes.

Os autores utilizaram o Google Acadêmico como banco de dados. Encontrando cerca de 164 artigos científicos. Porém, utilizaram apenas 5 artigos no referente trabalho.

Os autores ainda descrevem cada um dos 5 artigos científicos selecionados. Argumentando e comentando sobre o conteúdo de cada artigo, suas ideias, análises, experimentos e conclusões.

Araújo *et al.* (2022) conclui argumentando que as microalgas possuem efeitos positivos na germinação de sementes. Contudo, ponderam que para se obter melhores resultados, é necessário ter o investimento em pesquisas que consideram diferentes tipos de microalgas como biofertilizantes, além de alternativas que buscam avaliar a melhor forma de aplicação dos seus extratos.

Dagnaisser (2023) investiga o potencial biotecnológico das microalgas, especificamente

a *Arthrospira platensis* (Spirulina), cultivadas em águas residuárias da bovinocultura leiteira orgânica (ARB), para a produção de biofertilizantes aplicáveis ao cultivo de rúcula. A pesquisa foi dividida em duas etapas principais: a primeira etapa descreve a produção e caracterização da biomassa de microalgas em ARB, avaliando parâmetros físico-químicos, microbiológicos e a taxa de biofixação de CO₂; e a segunda etapa faz a comparação do efeito do biofertilizante de microalgas com a aplicação direta de ARB e ureia no desenvolvimento da rúcula, nas propriedades do solo e na qualidade microbiológica das folhas.

A autora descreve ainda sobre os parâmetros utilizados no trabalho, como o cultivo da microalga, no qual foram empregados cinco fotobiorreatores (FBRs), denominados R1 a R5, com volume útil de 1.600 L, sendo 1.350 L de água residuária da bovinocultura (ARB) e 250 mL de inóculo de *Arthrospira platensis* DHR 20 (*Spirulina*), proveniente do Laboratório de Monitoramento Ambiental II – Solo e Resíduos Sólidos da UFRRJ. O tempo de detenção foi de 3 dias. Os FBRs foram operados com injeção contínua de oxigênio (4 L/min) e iluminação constante por lâmpadas LED de 40 W, totalizando 160 W, durante 24 horas diárias. Foram realizadas nove rodadas experimentais entre março e abril de 2022, nas quais 1.350 L de biofertilizante foram coletados por rodada, armazenados em recipientes plásticos e congelados a -18 °C para posterior análise.

Além da avaliação do crescimento da microalga, que nesse caso os parâmetros de crescimento da biomassa avaliados incluíram densidade óptica (DO), biomassa seca e pH. Para a análise da DO, coletaram-se 2 mL de cada fotobiorreator (FBR), com leituras realizadas diariamente em triplicata, utilizando um espectrofotômetro Hach, modelo DR 3900. Essas medições visaram monitorar o desenvolvimento da biomassa de forma quantitativa e qualitativa.

Destaca-se também o processo de secagem da biomassa, no qual uma porção da biomassa de microalgas produzida foi separada da água residuária da bovinocultura (ARB) tratada mediante a adição de oito gotas de cloreto férrico, sob aeração, seguida de um período de repouso de uma hora para decantação da biomassa. Após essa etapa, a ARB tratada foi removida do recipiente, e a biomassa úmida foi submetida ao congelamento a uma temperatura de aproximadamente -18 °C. Posteriormente, a biomassa foi descongelada para a remoção da água superficial com o auxílio de um conta-gotas. O ciclo de congelamento e descongelamento foi repetido até que a biomassa atingisse o estado seco.

Teve outros fatores importantes a serem destacados do trabalho, como a Biofixação de CO₂ e caracterização Física, Química e Microbiológica da Biomassa de Microalgas.

Para Dagnaisser (2023) pode-se afirmar que os resultados indicam que o biofertilizante

de microalgas apresenta potencial como fonte de nitrogênio (N) e potássio (K), além de atuar como condicionador do solo, melhorando sua estrutura em comparação ao uso de ureia. A ARB e o biofertilizante não apresentaram restrições significativas quanto à sodicidade, mas evidenciaram limitações leves a moderadas em relação à salinidade. A taxa de biofixação de CO₂ demonstrou a viabilidade do cultivo de *Spirulina* em ARB para mitigação de gases de efeito estufa. Embora as plantas fertilizadas com ureia tenham apresentado desempenho superior em parâmetros como altura, número de folhas e massa seca, o biofertilizante de microalgas mostrou-se uma alternativa sustentável, com resultados microbiológicos seguros e benefícios para a qualidade do solo. Conclui-se que o uso de biofertilizantes à base de microalgas é promissor para a agricultura, alinhando-se a práticas de sustentabilidade ambiental.

De acordo com os estudos e análises de Ferreira *et al.* (2023), a prática constante da agricultura, podendo ser destacado a monocultura, diminui muito a quantidade de nutrientes que as plantas precisam para se desenvolver e crescer, e para sanar tal problema, o uso de fertilizantes é recomendado. Contudo, os fertilizantes sintéticos não são recomendados devidos a seus grandes impactos ambientais negativos. Por isso, o uso de energias renováveis, como os biofertilizantes, são bem mais recomendados para a utilização na agricultura familiar e industrial.

Ferreira *et al.* (2023) utilizaram alguns bancos de dados para fazer um mapeamento tecnológico buscando localizar artigos e patentes em certos sites específicos que possuem base de dados que tem ligação com o tema abordado na pesquisa. Os autores utilizaram alguns bancos de dados bem conhecidos, como o CNPq, a base de dados do *Science Direct*. Já a busca por patentes, foi utilizado dois bancos de dados bem famosos: a base de patentes brasileiras do Instituto Nacional de Propriedade Industrial (INPI) e a base europeia European Patent Office (Espacenet).

Com a metodologia abordado, foi possível identificar, no banco de dados do CNPq, cerca de 16 linhas de pesquisa, no qual são pertencentes a 9 grupos de pesquisas diferentes. A pesquisa, de acordo com os autores, foi bem satisfatória e quando analisados os dados, pode-se concluir que, apenas 7 estados possuem grupos de pesquisa que trabalham ou já trabalharam na área de biofertilização microalgal. Ou seja, apesar do Brasil ser referência no agronegócio mundial, poucas linhas de pesquisa na área da biofertilização a partir das microalgas foram criadas no país.

Já utilizando o banco de dados *Science Direct*, foram encontrados mais de 500 artigos pesquisados. Porém, esse resultado só foi atingido, devido a palavra-chave utilizada, que no

caso foi a “agricultura”. Quando os autores mudaram a palavra-chave para “biofertilizante” e “microalga”, foram encontrados resultados mais certos, totalizando 127 artigos encontrados. Depois das pesquisas, os artigos foram todos analisados e, os que estavam de acordo com o tema, foram selecionados, totalizando 100 artigos.

Após a análise dos melhores artigos, eles foram divididos em tópicos e subtópicos quando pertinentes.

Na divisão, foi-se separado a questão dos biofertilizantes para os bioestimuladores. Desse modo, parte da literatura científica concentra-se na utilização de microalgas ou de seus derivados, seja em virtude de suas propriedades nutricionais, seja devido à sua função como agentes bioestimulantes, os quais foram categorizados como eixos temáticos distintos no processo de classificação dos estudos.

A interpretação dos resultados dos artigos encontrados também considera a categorização variável de 'biofertilizantes' e 'bioestimulantes', ora como tópicos centrais, ora como subtópicos de 'biorrefinaria' e 'bioprodutos'. Enquanto parte dos artigos analisa sua produção e aplicação microalgal – incluindo efeitos no solo, ciclos sustentáveis e comparação com fertilizantes convencionais –, outros focam em bioprodutos de alto valor agregado. Nesses casos, os termos aparecem como subtópicos, indicando menção contextual, não enfoque principal.

Na literatura analisada, a maioria dos artigos estudados (61 artigos) discute a produção de microalgas mediante processos de biorremediação. Essa abordagem emerge como alternativa viável face às limitações inerentes aos métodos convencionais de tratamento de efluentes, cujas desvantagens operacionais e ambientais motivaram a adoção desta solução sustentável. A maior parte desses artigos que abordam a questão da biorremediação foi realizado, em primeiro lugar na Índia, em segundo lugar no Brasil e em terceiro lugar na Espanha.

A questão da patente foi um pouco mais escassa de resultados, sendo encontrados apenas 8 patentes com o tema descrito.

Os dados indicam distribuição desigual: 50% das patentes são de universidades federais, enquanto empresas nacionais detêm duas, uma pessoa física possui duas, e uma empresa indiana registrou uma. Nota-se concentração geográfica, com 6/7 patentes nacionais em São Paulo e apenas uma no Paraná.

O baixo volume de patentes, somado à forte centralização na região mais desenvolvida, reflete disparidades tecnológicas no setor.

Em contraponto, a Índia destaca-se na área devido a: sua grande demanda por soluções

agrícolas sustentáveis (segunda maior população global); as vantagens dos biofertilizantes microalgais (custo reduzido e menor impacto ambiental); sua estratégia de proteção internacional da propriedade intelectual.

Na base de dados internacional *Espacenet*, foram encontradas 21 patentes. A plataforma possui filtros para análise de dados como número de países de aplicação e frequência anual. Das 21 patentes analisadas, ocorreram 53 aplicações – indicando uso múltiplo em diversos países –, com tendência temporal ilustrada graficamente. A China liderou em registros (14), seguida pela OMPI/WIPO (8).

Ferreira *et al.* (2023) concluem a pesquisa salientando que estudos indicam que a monocultura de microalgas destinada exclusivamente à síntese de biofertilizantes apresenta limitações econômicas significativas. A estratégia mais viável fundamenta-se nos preceitos da biorrefinaria algal, que permite a cogeração de diversos bioprodutos de interesse comercial, maximizando assim a sustentabilidade financeira da operação. Além de que, as microalgas devem ser produzidas em efluentes, obtendo-se biomassa microalgal. Os estudos e pesquisas ainda possuem um número muito baixo no país, contudo mais grupos de estudos devem ser criados aproveitando todas as regiões do país (com diferentes climas, biomas e outras condições).

Bignon *et al.* (2023) em sua tese, cultivam quatro microalgas em água de reuso com NPK: *Chlorella vulgaris*, *Scenedesmus ecornis*, *Spirulina platensis*, *Spirulina labyrinthiformis*. Esse cultivo tem como objetivo avaliar a produtividade de biomassa e bioprodutos comerciais em microalgas cultivadas em água de reuso e o potencial bioestimulante da biomassa residual pós-extração.

Para a etapa de metodologia do artigo foi utilizado alguns componentes principais, como a água de reuso recolhida na saída da estação de Tratamento de esgoto localizada na cidade do Rio de Janeiro, as microalgas *Chlorella vulgaris* e *Scenedesmus ecornis* que foram cedidas pela UFSCAR, a microalga *Spirulina labyrinthiformis*, que foi cedida pela UFPB e a microalga *Spirulina platensis* que foi cedida pela UFF.

Para a etapa de experimentos, foram utilizados três principais reagentes: Hipoclorito de sódio (4-6%) P.A.- Isofar; Hexano P.A.- Isofar; Acetona P.A.- CRQ. Foram utilizados também alguns equipamentos e vidrarias, como a centrífuga Hettich Rotixa 50RS, Liofilizador Enterprise II Terroni, entre outros. Para o cultivo dos microrganismos foi preparada um meio de cultura baseado na água de reuso (suplementada com fertilizante comercial- NPK (04-14-08)) de uma estação de tratamento de esgoto.

O experimento empregou sementes de *Lactuca sativa* L. (ISLA) para analisar a

influência de biomassa microalgal proveniente de efluente tratado na germinação.

O cultivo microalgal em água de reúso pode comprometer a produtividade biomássica e a biossíntese de compostos de alto valor agregado, devido à potencial presença de substâncias inibitórias. Neste estudo, avaliou-se o crescimento de microalgas em água de reúso suplementada com NPK, comparando com meios WC e Zarrouk. Conforme demonstrado em uma das figuras do artigo (mais especificamente, a figura 9), observou-se um incremento significativo na biomassa de *Chlorella vulgaris* (0,28→0,55 g/L) e *Spirulina platensis* (0,52→0,92 g/L) no sistema com água de reuso. Contudo, *Scenedesmus ecornis* apresentou menor produção (0,19→0,39 g/L), enquanto *Spirulina labyrinthiformis* manteve estabilidade (0,69 vs 0,67 g/L) entre os sistemas.

Através da análise detalhada do autor, pode-se entender que a *Chlorella vulgaris* teve um maior crescimento devido à grande disponibilidade de fósforo encontrado na sua composição quando deixado em cultivo na água de reúso. A microalga *Scenedesmus ecornis* não apresentou um aumento significativo na sua produção quando colocada no meio de cultivo de água de reuso. Essa questão se deve a vários fatores, como por exemplo, haver algum componente tóxico que possa ter impedido a microalga de realizar suas atividades. A microalga *Spirulina platensis* obteve um bom resultado na sua concentração de biomassa (0,92 g/L), o que demonstra que ela possui potencial de crescimento em meios alternativos de cultivo. Já a microalga *Spirulina labyrinthiformis* tem uma boa capacidade de adaptação a meios alternativos, já que sua produção de biomassa em meio com água de reuso foi praticamente o mesmo que em meio padrão.

Foram realizados testes de fitotoxicidade com as biomassas cultivadas em água de reúso na germinação de sementes de *Lactuca sativa*. Os resultados obtidos foram bem conclusivos, ou seja, a microalga *Chlorella vulgaris* possui uma boa velocidade de germinação, além de uma boa porcentagem de índice de germinação e agrega muito no desenvolvimento da plântula, não causando um efeito tóxico no desenvolvimento da semente de alface. A microalga *Spirulina labyrinthiformis* possui um índice de germinação bem abaixo (abaixo de 80%, respectivamente), além de sua biomassa não causar um efeito significativo no aumento do desenvolvimento das raízes da alface. Podemos concluir então que, essa microalga nesse meio de cultivo com água de reuso, pode apresentar efeitos tóxicos na germinação de sementes. Nos testes de percentual de germinação, a microalga *Spirulina platensis* obteve bons resultados no cultivo da microalga com água de reuso com NPK. Já no parâmetro do índice de germinação, todos os resultados do cultivo foram acima de 80%, o que não indica toxicidade da biomassa, podendo ser considerada uma microalga segura para esse tipo de plantio de alface. Já a

Scenedesmus ecornis apresentou, principalmente no percentual de germinação e no índice de germinação resultados próximos a 100%, fazendo dela uma microalga atóxica e segura quando utilizada em solo com sementes de alface.

É possível concluir desse artigo que o cultivo realizado utilizando água de reuso nas microalgas *Chlorella vulgaris*, *Scenedesmus ecornis*, *Spirulina platensis* e *Spirulina labyrinthiformis* teve resultados muito bons na concentração de biomassa (g/L), principalmente nas microalgas *Chlorella vulgaris* e *Spirulina platensis*. Os resultados nos testes de toxicidade foram bem satisfatórios, podendo ser destacado as microalgas *Chlorella vulgaris* e *Scenedesmus ecornis* como atóxicas no desenvolvimento de sementes. Podemos destacar também a microalga *Spirulina platensis* por participar de vários outros experimentos desse artigo devido a alguns fatores como a produção de um composto de alto valor: a ficocianina e que possui uma fácil adaptação a vários meios alternativos.

De acordo com Albuquerque *et al.* (2024), o rabanete (*Raphanus sativus* L.) é uma hortaliça tuberosa que armazena uma grande quantidade de nutrientes do solo. Nesse artigo, o autor utiliza da biomassa da *Chlorella* sp. Como fonte de adubação orgânica para o rabanete, a fim de querer mostrar como esse tipo de biofertilização é bem mais sustentável e ecológica.

É apresentado no artigo um pouco sobre o funcionamento e a utilidade dos biofertilizantes na cultura agrícola. No qual, são extremamente importantes para o solo e para o desenvolvimento e crescimentos de plantas.

Albuquerque *et al.* (2024) utiliza cepas de *Chlorella* sp. Para o experimento, nos quais foram armazenadas no laboratório de biocombustíveis *green chemistry* (LABIOGREENC), localizado no Instituto de Ciências Exatas e Naturais do Pontal (Química) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Campus Pontal, Ituiutaba – Minas Gerais (MG). No processo do experimento, as microalgas foram deixadas em um sistema de cultivo com um fotoperíodo de 12/12 horas de escuridão e luz, a uma temperatura ambiente de cerca de 25°C. O principal meio utilizado no artigo foi o método de Guillard.

As cepas de *Chlorella* sp. Foram submetidas ao método de cultivo de batelada, no qual os microrganismos proliferam até alcançarem a fase estacionária, condição fisiológica definida pela cessão da disponibilidade de substratos nutricionais exógenos durante o processo de cultivo. Para determinar a biomassa final da *Chlorella* sp., as amostras que estavam nos reatores foram submetidas a uma centrifugação. Depois de finalizada, foram levadas para um béquer e submetidas a um processo de secagem em uma estufa a 80°C por 48 horas.

Para o cultivo do rabanete (*Raphanus sativus* L.), foi inserido em sacos de dimensões 20x30 as sementes do rabanete e um pouco de terra já peneirada, além da biomassa da *Chlorella*

sp. Para ser usada como biofertilizante. Para o tratamento das sementes, foram feitas cinco repetições cada. Os tratamentos foram executados por: T1: Controle – Apenas solo; T2: Solo + NPK (4gramas); T3: Solo + Biomassa algal (4 gramas); T4: Solo + Biomassa algal (2 gramas).

A Coleta para a análise foi feita 30 dias após o plantio, no qual foi avaliado vários parâmetros importantes, podendo ser destacados: biomassa seca (BC), parte aérea (PA), biomassa fresca (BF), raiz tuberosa (RT), comprimento da raiz principal (CRP), diâmetro da raiz tuberosa (DRT) e altura total da planta (ATP).

Constata-se que nenhuma das intervenções experimentais demonstrou diferenças estatisticamente significativas, impossibilitando a conclusão acerca da viabilidade de utilização de microalgas como agentes biofertilizantes na cultura de *Raphanus sativus* L. Todavia, cabe ressaltar que tanto a metodologia de aplicação quanto a duração do período experimental constituem variáveis críticas que podem exercer influência determinante nos parâmetros avaliados.

Os dados quantitativos relativos à biomassa úmida não evidenciaram variações estatisticamente significativas entre os diferentes protocolos experimentais. Nas fases fenológicas iniciais do desenvolvimento vegetal, as distintas concentrações de cultivos microalgáceos e a aplicação de fertilizantes sintéticos não demonstraram efeitos significativos sobre os parâmetros biométricos da massa fresca vegetal. A não-significância estatística na biomassa úmida pode decorrer de certos fatores, como das interações complexas solo-substrato, da variabilidade edafoclimática e das respostas diferenciadas da planta aos tratamentos.

De modo análogo, os parâmetros biométricos relativos à biomassa seca da parte aérea, raiz tuberosa e sistema radicular primário não apresentaram variações estatisticamente significativas entre os diferentes tratamentos experimentais. Essa homogeneidade nos dados indica que, dentro do período analisado, as distintas concentrações de cultivos microalgáceos e a aplicação de fertilizante sintético não exerceram influência estatisticamente relevante sobre os componentes vegetais avaliados.

Ou seja, depois de todas as análises feitas é possível chegar a um resultado definitivo, no qual pode ser esclarecido que não foram observadas divergências estatisticamente significativas entre os tratamentos.

É passível de conclusão determinar que apesar da ausência de significância estatística, microalgas como biofertilizantes mostraram potencial promissor. A microalga *Chlorella* sp. possui nutrientes biodisponíveis que podem substituir parcialmente fertilizantes sintéticos, porém requerem otimização de dosagens e métodos para comprovação definitiva de eficácia, sendo o delineamento experimental crucial para esses resultados.

Oliveira *et al.* (2024) avaliou que um biofertilizante de microalgas foi testado na germinação de *Lactuca sativa* L. (alface americana) em condições controladas (DBO: 25°C, 12h luz), utilizando concentrações de 0-9 mL do produto com água destilada (4-13 mL), em cinco repetições. Não houve diferenças estatísticas nas avaliações aos 4 e 7 dias.

O autor elucida a discussão em torno de como os biofertilizantes derivados de microalgas veem ganhando significativa relevância, consolidando-se como foco de diversos estudos científicos e pesquisas aplicadas. As microalgas são de suma importância para o meio ambiente e a sua sustentabilidade, devido a diversos fatores ambientais positivos, como alta eficiência fotossintética e capacidade de fornecer nitrogênio em formas assimiláveis pelas plantas.

Dito isso, o autor decidiu por utilizar para a produção de um biofertilizante eficaz a microalga *Chlorella vulgaris*, para poder avaliar seu potencial de germinação na semente de *Lactuca sativa* L.

As microalgas para produção de biofertilizante foram coletadas em um reservatório eutrofizado do Instituto Federal Goiano - Campus Ceres (GO, Brasil), que faz parte do sistema de biodigestão. As amostras, acondicionadas em recipientes estéreis vedados, foram transferidas ao Laboratório de Biologia Vegetal. Os cultivos foram mantidos sob iluminação natural com aeração passiva para indução do florescimento. Utilizou-se meio WC para desenvolvimento das cepas, promovendo metabolismo autotrófico via fotossíntese com fontes inorgânicas de carbono.

Para poder realizar o experimento, a caracterização das cepas de *Chlorella vulgaris* por microscopia óptica e confirmação de biomassa máxima, procedeu-se à preparação do biofertilizante. A suspensão algal, incluindo meio de cultivo, foi transferida para recipiente adequado e homogeneizada.

As sementes de *Lactuca sativa* L. foram distribuídas em papéis Germitest, tanto tratados quanto não tratados com extrato de microalgas (biofertilizantes). Depois, foram inseridas algumas substâncias em cada semente, como extrato de microalgas e água destilada.

Para contagem celular, coletaram-se alíquotas de 10 mL do cultivo principal, submetidas a vórtex por 60 segundos. Aspiraram-se 10 μ L com micropipeta calibrada para enumeração em câmara de Neubauer, seguindo protocolo de autores como Morandi e Almeida, com padrão zigue-zague, contando apenas células intersectando bordas superior e esquerda.

O monitoramento da germinação de sementes de *Lactuca sativa* L. foi realizado em dois intervalos temporais distintos: a primeira avaliação ocorreu 4 dias pós-semeadura, considerando exclusivamente plântulas normais - caracterizadas por exibirem desenvolvimento adequado

tanto do sistema radicular quanto da parte aérea, demonstrando viabilidade fisiológica. A segunda avaliação, conduzida 7 dias após a semeadura, englobou a análise trifásica de plântulas normais, plântulas anômalas e sementes quiescentes.

De acordo com o Teste Padrão de Germinação (TPG), as taxas de germinação observadas foram de 63,60% e 63,20% para as concentrações de 0 e 3 mL de microalgas, respectivamente. Em contrapartida, nas concentrações superiores (6 e 9 mL), registrou-se um decréscimo significativo nos índices germinativos, atingindo 51,60% e 48,80%. A análise estatística posterior demonstrou ausência de diferenças significativas ($p>0,05$) entre o grupo controle e os tratamentos experimentais, conforme apresentado em uma das tabelas fornecidas pelo artigo (Tabela 1).

Estudos comprovam os benefícios de biofertilizantes de microalgas no desenvolvimento inicial de *Lactuca sativa*. Faheed e Fattah em sua obra, observaram que *Chlorella vulgaris* em substratos aumentou significativamente a germinação, correlacionando-se com maior teor de carboidratos solúveis, proteínas e aminoácidos versus controle, evidenciando seu potencial agrônômico.

Podemos destacar que a suspensão de *Chlorella vulgaris* aumentou significativamente a germinação versus controle (meio estéril). Contudo, requerem-se estudos adicionais sobre alguns quesitos, como por exemplo, sua composição bioquímica e de como os estádios fenológicos das culturas afetam a eficiência da aplicação como bioestimulante, especialmente em dose e momento ideais.

Pode-se concluir desse artigo que os biofertilizantes microalgais testados não tiveram efeito significativo ($p>0,05$) na germinação de *Lactuca sativa* L. Embora promissores para agricultura sustentável, os resultados indicam lacunas no conhecimento, exigindo pesquisas futuras para tentar compreender seus mecanismos de ação e para tentar otimizar protocolos de aplicação.

Em consonância com Torres et al. (2024), o presente artigo busca investigar o real potencial da microalga *Chlorella vulgaris* como um poderoso biofertilizante, em decorrência a alternativas mais sustentáveis e menos nocivas ao meio ambiente.

A cepa de *Chlorella vulgaris* foi adquirida no laboratório de viveiro ProCycles da Universidade da América- Bogotá. As microalgas foram cultivadas em fotobiorreatores esterilizados. Durante todo o período de cultivo das microalgas foram mantidas condições controladas de luz e agitação. Já a temperatura ambiente média foi mantida durante todo o processo entre 14 e 20 °C, que é a faixa considerada ideal para o crescimento e desenvolvimento da *Chlorella vulgaris*.

Em relação aos meios de cultura, foram feitas duas safras: a primeira foi feita a partir do meio tradicional de canteiro, que consiste em uma mistura de água deionizada e o meio Fertifoliar, que é produzido pela concentração de nitrogênio, fósforo e potássio solúvel, além de ter sido inserida na mistura 10 mL de *Chlorella vulgaris*. A segunda safra é formada por águas residuais da indústria alimentícia, que foram usadas como meio de cultura alternativo para determinar o potencial de redução da geração de resíduos. O tempo de cultivo, que antes era de 2 semanas, foi estendido para 37 dias. Para que, assim, fosse possível obter um maior percentual de crescimento da biomassa microalgal.

Empregou-se um delineamento bifatorial [2(3×2)] para avaliar biofertilizantes no desenvolvimento de *Raphanus sativus* e *Lepidium sativum*, testando três tratamentos. O primeiro foi de biofertilizantes (culturas 1 e 2) e fertilizante sintético, com triplicatas e controle (água destilada), seguido de cálculo do índice germinativo.

Os resultados obtidos foram descritos da seguinte forma pelo autor: O cultivo foi estendido para 37 dias devido à estabilização da biomassa após 15 dias. A cultura 1 apresentou crescimento exponencial (dia 20: 0,929 UA; dia 23: 1,522 UA; taxa: 0,164 d⁻¹), enquanto a cultura 2 exibiu morte celular, possivelmente pela formação de espuma que causou gradientes de luz, nutrientes e pH no sistema.

A análise nutricional mostrou diferenças significativas (p<0,05) entre os cultivos. No qual podemos afirmar que a cultura 1 apresentou pH ótimo (7,0) de acordo com estudos de Collahuazo & Araújo (2019), enquanto a cultura 2 teve pH subótimo (6,5). Condutividade elétrica, P, N, Ca e Cu não diferiram entre biofertilizantes.

Por fim, podemos concluir que diferenças significativas (p<0,05) foram observadas: a cultura 1 exibiu crescimento exponencial (0,164 d⁻¹), enquanto a cultura 2 apresentou declínio celular (biomassa: 0,034 g), possivelmente devido à espuma no efluente. A inibição germinativa sugere fitotoxicidade, embora microalgas permaneçam promissoras para biofertilizantes sustentáveis.

O presente artigo desenvolvido por BARBOSA *et al.* (2024) teve como objetivo avaliar os efeitos da microalga *Chlorella sorokiniana* e da bactéria *Bradyrhizobium japonicum*, aplicadas individualmente (inoculação) e em combinação (coinoculação), como agentes bioestimulantes dos parâmetros agronômicos da cultura da soja.

A autora destaca o quanto a soja é um grão versátil e muito importante para o agronegócio brasileiro, pois ela serve tanto para a alimentação humana quanto para a alimentação animal. Por esse e outros motivos, é necessário ter opções mais sustentáveis e que possam ajudar a soja a ter um desenvolvimento cada vez mais elevado. Por isso as microalgas

são uma das principais fontes de ajuda no cultivo no cenário agrícola, sendo responsáveis pela produção de alguns bioprodutos, como os biofertilizantes e os bioestimulantes.

O artigo foi desenvolvido em casa de vegetação e em condições de campo na Estação Experimental do Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná. As microalgas *Chlorella sorokiniana* foram fornecidas de culturas do laboratório de microbiologia do solo do Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná.

As microalgas foram cultivadas em meio de cultura com líquido BBM (Bold's Basal Medium). Foram feitos dois principais experimentos, sendo um na casa de vegetação e o outro, em condições de campo para avaliar o tratamento das sementes de soja.

O experimento 1 foi realizado em casa de vegetação (nov/2023; $28,5 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$) com túnel de polietileno anti-UV ($15 \times 7 \times 3$ m). Utilizou-se delineamento em blocos casualizados (4 repetições) com bandejas de areia (2,5 kg). Foram testados seis tratamentos em Glycine max (cv. BMX Zeus IPR): 1) Controle; 2) *B. japonicum* (2 mL kg^{-1} ; $10^{10} \text{ UFC mL}^{-1}$); 3-6) Combinações com *C. sorokiniana* (IPR 7070/7104; sobrenadante ou pellet 25 mL). Sementes (3 kg/tratamento) foram semeadas (50/bandeja), irrigadas (10% umidade), e avaliadas 7 dias após a semeadura (emergência) e 14 dias após a semeadura (matéria seca total).

Já o experimento 2 avaliou sete tratamentos em delineamento de blocos casualizados com cinco repetições, incluindo: controle absoluto, adubação nitrogenada exclusiva (200 kg ha^{-1} de ureia no estádio V3), inoculação com *Bradyrhizobium japonicum* e quatro combinações deste com sobrenadante ou pellet de *Chlorella sorokiniana* (estirpes IPR 7070 e 7104). As parcelas experimentais (4×6 m) utilizaram a cultivar BMX Zeus IPR, semeada em novembro/2023 com aplicação de 300 kg ha^{-1} de NPK 04-20-20 e manejo fitossanitário padronizado. No estádio R2, avaliou-se a nodulação (contagem em raízes lavadas com peneira de 0,5 mm), biomassa (secagem a 65°C), teor de clorofila (ClorofiLog® 10-12h) e produtividade (colhedora Wintersteiger®, umidade corrigida para 13%). Os dados foram analisados por ANOVA e teste de Tukey ($p < 0,05$) no SAS® 9.4.

Os resultados demonstraram que tanto a emergência quanto a produção de biomassa seca das plântulas não apresentaram variações significativas ($p > 0,05$) em função da inoculação individual ou combinada de *Bradyrhizobium japonicum* com as microalgas *Chlorella sorokiniana* (estirpes IPR 7104 e IPR 7070). A porcentagem média de emergência atingiu 98,0%, enquanto a produção de matéria seca variou entre 0,023 e 0,046 g por plântula, podendo ser conferido os resultados na tabela 2 do artigo. Adicionalmente, constatou-se que os tratamentos com inoculantes não promoveram melhorias significativas nos parâmetros de nodulação nem nas demais variáveis fitotécnicas avaliadas.

BARBOSA *et al.* (2024) conclui seu artigo salientando que os resultados evidenciaram que a aplicação de *Chlorella sorokiniana* (estirpes IPR 7104 e IPR 7070), tanto de forma isolada quanto em coinoculação com *Bradyrhizobium japonicum*, não apresentou efeitos bioestimulantes significativos ($p > 0,05$) quando utilizada como tratamento de sementes em soja.

Nos estudos e pesquisas de Cabral *et al.* (2024), as microalgas oferecem solução sustentável para tratamento de efluentes urbanos, especialmente em países como a Espanha, convertendo nutrientes (N, P) em biomassa agrícola. Este trabalho avaliou microalga *Scenedesmus* spp. (10,83% MS; 2,87% N; 0,37% P) como biofertilizante para *O. basilicum*, testando quatro tratamentos em diferentes solos. Os resultados mostraram aumentos significativos ($p < 0,05$) nos parâmetros de crescimento, especialmente com o tratamento sonificado. Embora promissora para a agricultura circular, a técnica requer otimizações para ampla aplicação.

O uso de microalgas para o tratamento de águas residuais está nivelado com os princípios da economia circular, ao promover a reciclagem de recursos dentro do sistema agrícola. O experimento para avaliar a biomassa de microalgas cultivadas em águas residuais urbanas foi realizado em duas fases distintas, sendo diferenciadas apenas pelo tipo de substrato utilizado em cada experimento.

O estudo empregou inicialmente o substrato *Sphagnum* devido às suas propriedades higroscópicas, otimizando a absorção de biofertilizantes e permitindo comparações controladas. Na fase subsequente, utilizou-se solo natural para avaliar a eficácia dos tratamentos em condições menos ideais, testando quatro regimes: controle, biofertilizante congelado (-20°C), sonificado (20 kHz, 15 min) e liofilizado. O experimento com *Ocimum basilicum* L. foi conduzido no Laboratório IIAMA por 56 dias (abril-junho/2024) sob fotoperíodo natural (14:10 h), utilizando triplicatas com 5 sementes por unidade. A irrigação (20-40 mL/dia) manteve umidade entre 50-60%, com aplicação padronizada de biofertilizantes a 30 mm de profundidade e semeadura de 3 vezes o diâmetro da semente.

A biomassa de *Scenedesmus* spp. foi cultivada em efluentes do decantador primário da ETAR (Alboraya, Valência- Espanha) utilizando fotobiorreatores de 8 L (20 cm diâmetro), sob aeração com difusores de bolhas finas e iluminação LED ($92 \pm 20 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) entre fevereiro-abril/2024. O cultivo (ciclos de 5 ± 1 dias) manteve pH 6,0-7,0 e eliminou *E. coli*, sendo a biomassa posteriormente centrifugada ($3000 \times g$, 15 min) para processamento como biofertilizante.

A caracterização físico-química, que representa a dosagem de biofertilizante, está representada na tabela 7 do artigo. No qual indicou um teor de N (2,87%) conforme a normativa

espanhola (Real Decreto 506/2013) e relação N:P (8:1) dentro da faixa reportada para sistemas de tratamento (Park et al., 2011). Para atingir $200 \text{ kgN}\cdot\text{ha}^{-1}$, Álvarez-González *et al.*, (2022) aplicaram $207,74 \text{ mgN}\cdot\text{vaso}^{-1}$, equivalente a 7,24 g de biofertilizante fresco ou 0,7840 g liofilizado.

A ANOVA ($\alpha=0,05$) não revelou efeitos significativos na germinação: fase 1 ($p=0,087$) com médias de 1,00 (sonicado) a 0,80 (congelado); fase 2 ($p=0,39$) em solo natural. As variações refletem a heterogeneidade edáfica e fisiológica inerente ao material biológico.

Os efeitos na germinação determinaram que a taxa de germinação de *Ocimum basilicum* L. foi analisada como indicador primário da eficácia de biofertilizantes microalgais. Na fase 1, representada na tabela 9, comenta que não houve diferenças significativas entre tratamentos (ANOVA, $p=0,087$), com médias variando de 1,00 (sonicado) a valores inferiores (controle/liofilizado), atribuíveis a fatores intrínsecos e ambientais. Na fase 2, representada pela tabela 10, estabelece que não existe significância estatística ($p=0,39$). As médias foram 0,87 (controle) a 0,60 (liofilizado). A variação entre fases indica forte influência do substrato, sugerindo que a complexidade do solo natural (microbiota e propriedades físico-químicas) modula a resposta germinativa.

Os efeitos de fertilização no crescimento das plantas foram analisados conforme duas fases foram sendo feitas. Na análise da fase um podemos concluir que os tratamentos apresentaram padrões de crescimento distintos, com o controle ($y_B = 0,0081x^2 + 0,6389x + 4,2968$; $R^2=0,98$) mostrando um desenvolvimento mais lento após 20 dias, enquanto o tratamento sonicado ($y_S = 0,0297x^2 + 0,842x + 5,8879$; $R^2=0,99$) exibiu desempenho superior nos primeiros 40 dias, validando os modelos quadráticos aplicados. Já na fase 2, o controle ($y_B = 0,0198x^2 + 0,8884x$) apresentou um crescimento superior à fase 1 ($y_B = 0,0081x^2 + 0,6389x + 4,2968$), evidenciando o efeito positivo do substrato natural. Enquanto congelamento e sonicagem mantiveram padrões consistentes. A liofilização mostrou variações significativas, indicando dependência das propriedades do substrato.

Por fim, é avaliado pelo autor as variáveis físicas dos experimentos 1 e 2. No experimento 1, a análise morfofisiológica, localizada na imagem 23 do artigo, identificou diferenças significativas em 5/9 parâmetros (comprimento/diâmetro caulinar, índice foliar, biomassa fresca/seca), com superioridade do tratamento sonicado em três variáveis. O sistema radicular não mostrou variações significativas (39-56 mm), exceto na liofilização. Todos os tratamentos aumentaram o comprimento caulinar ($p<0,01$), com +37% na sonicagem, atribuído à maior biodisponibilidade nutricional por fragmentação mecânica de acordo com Jimenez *et al.*, Suleiman *et al* (2020). Incrementos no índice foliar e diâmetro caulinar, além de +23% na

biomassa fresca com sonicagem evidenciam que a modificação física da biomassa altera sua eficácia como biofertilizante de forma parâmetro-dependente.

No experimento 2, a análise morfofisiológica, analisada pela imagem 25 do artigo, revelou diferenças significativas ($p < 0,05$) em 5/9 parâmetros avaliados, destacando a superioridade do tratamento por congelação em três variáveis foliares. O sistema aéreo apresentou respostas distintas: aumento no diâmetro caulinar com sonicagem ($10,85 \pm 0,32$ vs $1,45 \pm 0,12$ mm no controle) e incrementos nas dimensões foliares com congelação, enquanto o número de folhas não variou significativamente. O sistema radicular não mostrou alterações relevantes. A sonicagem promoveu maior teor hídrico ($p < 0,01$) e biomassa fresca, sem afetar a biomassa seca. Estes resultados sugerem que a congelação preserva compostos bioativos foliares, enquanto a sonicagem influencia principalmente a estrutura caulinar e absorção hídrica, indicando a necessidade de estudos moleculares e de otimização de protocolos combinados.

É analisado no artigo também a comparação entre as culturas das fases 1 e 2. No qual, podemos resumir comentando sobre como os dados obtidos validam a hipótese de que o substrato natural proporciona nutrientes essenciais que potencializam a atividade fotossintética, conforme evidenciado pelos parâmetros observados no grupo controle. A análise estatística não revelou diferenças significativas nos teores de clorofila entre as fases experimental e controle para os tratamentos controle, congelado e sonificado, com valores encorpados com os intervalos de referência estabelecidos na fase inicial. Estes achados demonstram que, à exceção do protocolo de liofilização, todos os demais tratamentos mantiveram a eficiência fotossintética dentro dos parâmetros fisiológicos esperados, em conformidade com os padrões de referência estabelecidos na fase 1.

O autor conclui o artigo fazendo uma observação referente aos resultados obtidos. Embora, tenham sido encontradas certas diferenças significativas nas diversas variáveis com o biofertilizante e controle, a variabilidade intrínseca das condições ambientais pode ter exercido influência significativa nos resultados obtidos. O estudo tem limitações metodológicas, como poucas replicações de longo prazo, variabilidade sazonal e análise restrita a N e P. Embora as diferenças não sejam estatisticamente significativas, os tamanhos de efeito (d de Cohen $> 0,8$) sugerem necessidade de maior poder amostral.

A falta de avaliação da microbiota rizosférica e micronutrientes limita a compreensão da eficácia dos biofertilizantes. Recomenda-se estudos futuros com monitoramento contínuo, caracterização físico-química e biológica do solo, e análises multivariadas das interações planta-solo. Perspectivas devem explorar mecanismos moleculares, sinergias microbianas e

eficiência em diferentes ecorregiões para otimizar formulações agroecológicas.

Os resultados desta revisão bibliográfica demonstram que o uso de microalgas como biofertilizantes é uma alternativa viável e sustentável para diferentes culturas de interesse econômico e social. Evidências apontam que sua aplicação não apenas aumenta a produtividade agrícola, mas também melhora a qualidade do solo e dos produtos cultivados, beneficiando tanto a agricultura familiar quanto a empresarial (Acién Fernández, 2018; Collahuazo-Reinoso *et al.*, 2019). No entanto, apesar desses benefícios, ainda persistem desafios significativos, como a escassez de patentes e a baixa transferência dessa tecnologia para o mercado (da Silva *et al.*, 2019), o que sugere uma lacuna entre a pesquisa acadêmica e a aplicação em larga escala.

Apesar das vantagens, algumas limitações precisam ser consideradas. O cultivo de microalgas em escala comercial ainda enfrenta obstáculos, como altos custos de produção, necessidade de infraestrutura especializada (fotobiorreatores) e variações na eficácia conforme o tipo de solo e clima (da Silva *et al.*, 2019). Além disso, embora estudos demonstrem ganhos de produtividade em cultivos específicos, faltam pesquisas comparativas de longo prazo que avaliem seu desempenho frente a fertilizantes tradicionais em diferentes contextos agrícolas.

Figura 2- Meio de cultura de *Chlorella* sp.



Fonte: Próprio autor.

Figura 3- Meio de cultura de *Chlorella* sp (Recipiente C apresentou contaminação)



Fonte: Próprio autor.

Dentre os diversos táxons levantados, que são comumente utilizadas na obtenção de biofertilizantes, destacam-se os gêneros *Scenedesmus*, *Spirulina* e *Chlorella*. Estes são os gêneros que apresentam o maior número de citações em todos os levantamentos realizados sobre este tema. Mostrando as suas versatilidades no desenvolvimento de biofertilizantes e ajuda nas questões da bioeconomia (Lira (2011); Acién Fernández *et al.* (2018); GUEDES (2018); Collahuazo-Reinoso *et al.* (2019); Ortiz-Moreno *et al.* (2019); da Silva *et al.* (2019); DE SOUZA *et al.* (2019); Gonzalo *et al.* (2020); DE LIRA *et al.* (2021); Araújo *et al.* (2022); Ferreira *et al.* (2023); Bignon *et al.* (2023); Albuquerque *et al.* (2024); Torres *et al.* (2024); BARBOSA *et al.* (2024); Cabral *et al.* (2024)).

Em uma perspectiva global, os biofertilizantes à base de microalgas representam uma estratégia promissora para alinhar produção agrícola, sustentabilidade e segurança alimentar. Contudo, para que seu potencial seja plenamente alcançado, são necessários alguns fatores relevantes, como a questão do maior investimento em pesquisa aplicada, visando superar as barreiras técnicas e econômicas; políticas públicas que incentivem a adoção dessas tecnologias

por pequenos e grandes produtores; Divulgação científica para conscientizar agricultores e indústrias sobre os benefícios ambientais e econômicos desses insumos.

Dessa forma, embora os biofertilizantes microalgais ainda estejam em fase de consolidação, seu desenvolvimento contínuo pode transformá-los em pilares de uma agricultura mais sustentável e resiliente no futuro.

6 CONCLUSÃO

Esta revisão bibliográfica demonstra que as microalgas representam uma alternativa viável e sustentável para a produção de biofertilizantes agrícolas, oferecendo vantagens econômicas e ambientais em comparação com os fertilizantes sintéticos tradicionais. O uso excessivo desses insumos convencionais tem sido associado a graves impactos ambientais, incluindo degradação do solo, contaminação de recursos hídricos e riscos à saúde pública, evidenciando a urgência na adoção de práticas agrícolas mais sustentáveis.

Nesse contexto, os biofertilizantes à base de microalgas destacam-se não apenas por sua capacidade de melhorar a produtividade agrícola, mas também por seu potencial de reduzir a dependência de produtos químicos nocivos. Contudo, para que essa tecnologia atinja plena efetividade, são necessários avanços significativos em pesquisa aplicada, desenvolvimento de técnicas de cultivo economicamente viáveis e maior integração entre os setores científico, produtivo e governamental.

Diante do exposto, fica evidente que a transição para modelos agrícolas baseados em insumos biológicos constitui um caminho estratégico para conciliar segurança alimentar com preservação ambiental. Para tanto, torna-se essencial o estabelecimento de políticas públicas que incentivem essa mudança paradigmática, garantindo assim um futuro mais sustentável para a agricultura e para a sociedade como um todo.

REFERÊNCIAS

ABREU, A. H. M. DE, ALONSO, J. M., MELO, L. A. DE; LELES, P. S. DOS S., & SANTOS, G. R. DOS. (2019). Caracterização de bio sólido e potencial de uso na produção de mudas de *Schinus terebinthifolia* Raddi. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 24(3), 591–599. <https://doi.org/10.1590/s1413-41522019108265>.

ACIÉN FERNÁNDEZ, FERNÁNDEZ SEVILLA, GRIMA, Francisco Gabriel, José Maria, Emilio Molina. *CONTRIBUCIÓN DE LAS MICROALGAS AL DESARROLLO DE LA BIOECONOMÍA*, Espanha, p. 1-24, 2018. Disponível em: <file:///C:/Users/User/Desktop/Artigos%20para%20a%20produção%20do%20tcc%20sobre%20biofertilizantes/Dialnet-ContribucionDeLasMicroalgasAlDesarrolloDeLaBioecon-6648783.pdf>.

ALBUQUERQUE, GUERRA, OLIVEIRA, CHIESA, MARTINS, BATISTA, K.G., W.D., F.C., J.E., A.M., A.C. Aplicação da biomassa da microalga *Chlorella* sp. como biofertilizante no cultivo de *Raphanus sativus* L., [S. l.], p. 1-10, 8 jan. 2024. Disponível em: <file:///C:/Users/User/Desktop/Artigos%20para%20a%20produção%20do%20tcc%20sobre%20biofertilizantes/44739-Article-467390-1-10-20240108.pdf>.

ALMARALES ARCEO, Ángel. Produção de biodiesel mediante o processo de Hidroesterificação da biomassa das microalgas *Scenedesmus dimorphus* e *Nannochloropsis oculata*., [S. l.], p. 205, maio 2012. Disponível em: <http://186.202.79.107/download/producao-de-biodiesel-da-biomassa-das-microalgas.pdf>. Acesso em: 25 maio 2024.

ALVAREZ, A. L.; WEYERS, S. L.; GOEMANN, H. M.; PEYTON, B. M.; GARDNER, R. D. Microalgae, soil and plants: A critical review of microalgae as renewable resources for agriculture. *Algal Research*, 54(102200), 2021, ISSN 2211-9264, <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102200>.

ALVES, Ailson José Lourenço. *O Cultivo de microalgas e suas aplicações: Uma revisão de literatura*. 2021.

ARAÚJO, MACHADO, ITO MORIOKA, MARI MURATA, BONIFACIO DA SILVA MARQUES, HIROSHI SUGUIMOTO, Barbara, Wesley, L.R., Mayara, Josemeyre, Hélio. Uso de Microalgas como Bioestimuladoras da Germinação de Sementes, São Paulo-SP, p. 1-5, 2022. Disponível em: <file:///C:/Users/User/Desktop/Artigos%20para%20a%20produção%20do%20tcc%20sobre%20biofertilizantes/10+-+Uso+de+Microalgas+-+9966.pdf>.

ANDRADE, D. S.; AMARAL, H. F.; GAVILANES, F. Z.; MORIOKA, L. R. I.; NASSAR, J. M.; MELO, J. M.; SILVA, H. R.; TELLES, T. S. Microalgae: cultivation, biotechnological, environmental, and agricultural applications. In: MADDELA, N. R.; CRUZATTY, L. C. G.; CHAKRABORTY, S. (Ed). *Advances in the domain of environmental biotechnology*. Singapura: Springer, 2021. p. 635-701.

BARBOSA, JÉSSICA ZANELATTO. microalgas (*chlorella sorokiniana*) no

tratamento de sementes de soja: inoculação e coinoculação, Cascavel-PR, p.1-44, mar. 2024. Disponível em:

<file:///C:/Users/User/Desktop/Artigos%20para%20a%20produção%20do%20tcc%20sobre%20biofertilizantes/Jéssica%20Zanelatto%20Barbosa.pdf>.

BENEDITO, V. M., PORTO, P. S. S. & FREITAS, R. R. (2019). Modelagem do crescimento de microalgas: Um estudo bibliométrico. *Research, Society and Development*, 8 (1), e681511. <https://doi.org/10.33448/rsd-v8i1.511>

BERTOLDI, F.C.; SANT'ANNA, ERNANI; OLIVEIRA, J.L.. Revisão: Biotecnologia de microalgas. *Boletim do Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos*, v. 26, n. 1, p. 9-20, 2008.

BIGNON, Leticia Moraes Pereira. Avaliação da produção de biomassa de microalgas em meios alternativos e sua utilização como bioestimulante vegetal, Rio de Janeiro-RJ, p.1-138, 2023. Disponível em:

[file:///C:/Users/User/Desktop/Artigos%20para%20a%20produção%20do%20tcc%20sobre%20biofertilizantes/Tese%20-%20Leticia%20Moraes%20Pereira%20Bignon%20-%202023%20-%20Completa%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/User/Desktop/Artigos%20para%20a%20produção%20do%20tcc%20sobre%20biofertilizantes/Tese%20-%20Leticia%20Moraes%20Pereira%20Bignon%20-%202023%20-%20Completa%20(1).pdf).

BORGES, W. DA S. Produção de bio-óleo empregando microalgas em diferentes meios de cultivo. [s.l.] Tese (Doutorado em Engenharia Química), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014.

BONILLA CEDREZ, C.; CHAMBERLIN, J.; GUO, Z.; HIJMANS RJ. Spatial variation in fertilizer prices in Sub-Saharan Africa. *PLoS One*, 15(1), e0227764, 2020. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0227764>.

BORTOLOTI, G.; SAMPAIO, R. M. Bioeconomia, bioenergia e bioinsumos: um estudo a partir da cana-de-açúcar e do controle biológico do bicudo. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO E SOCIOLOGIA RURAL, 60., 2022a, Natal. Anais [...]. Natal: UFRN, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.29327/sober2022.486397>.

BORTOLOTI, G. Características da inserção dos bioinsumos para controle biológico no mercado fitossanitário brasileiro. 2022. Dissertação (Mestrado em Sanidade, Segurança Alimentar e Ambiental no Agronegócio) - Instituto Biológico, São Paulo, 2022. Disponível em: <http://repositoriobiologico.com.br/jspui/handle/123456789/1190>.

PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA CASA CIVIL. Decreto-Lei nº 6.894, de 16 de dezembro de 1980. Dispõe sobre a inspeção e a fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes, estimulantes ou biofertilizantes, remineralizadores e substratos para plantas, destinados à agricultura, e dá outras providências. Brasília, p. 1, 16 dez. 1980. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/1980-1988/16894.htm#:~:text=LEI%20N%206.894%2C%20DE%2016%20DE%20DEZEMBRO%20DE%201980.&text=Dispõe%20sobre%20a%20inspeção%20e,agricultura%2C%20e%20dá%20outras%20providências.

BRASIL, B. S. A. F., e COSTA, L., 2016. Microalgas. *Agroenergia em revista*. Embrapa Agroenergia, Brasil. Ano IV, dez. 2016, nº 10, p. 04-54.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). Decreto Nº 4.954 de 14 de janeiro de 2004. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF (14 jan. 2004).

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA)/Secretaria de Defesa Agropecuária. Instrução Normativa Nº 61, de 8 de julho de 2020. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF (15 jul. 2020).

Carneiro, G. A., Silva, J. J. R., Oliveira, G. A. & Pio, F. P. B. (2018). Uso de Microalgas para Produção de Biodiesel. *Research, Society and Development*, 7 (5), e1075181. <https://doi.org/10.17648/rsd-v7i5.250>

CASTRILLÓN, CARMONA, LÓPEZ, ARISTIZABAL, L. Rendón, M. Ramírez, C. Ocampo, R. Giraldo. Evaluation of the operational conditions in the production and morphology of *Chlorella* sp. Evaluation of the operational conditions in the production and morphology of *Chlorella* sp, *Brazilian Journal of Biology*, 21 fev. 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/bjb/a/B7KjwvwwTgFVMDZD8RtXJ6F/?lang=en#>. Acesso em: 20 jun. 2024.

COELHO, E.F.; COSTA, E.L.; BORGES, A.L.; NETO, T.M.A.; PINTO, J.M. Fertirrigação. Informe Agropecuário, Belo Horizonte, v.31, n.259, p.58-70, 2010

COLLA, G.; ROUPHAEL Y. Microalgae: new Source of Plant Biostimulants. *Agronomy*, 10(9), 1–4, 2020.

COPPENS, J.; GRUNERT, O.; VAN DEN HENDE, S.; VANHOUTTE, I., BOON, N.; HAESAERT, G.; GELDER LD. The use of microalgae as a high-value organic slow-release fertilizer results in tomatoes with increased carotenoid and sugar levels. *J Appl Phycol*, 28, 2367–2377, 2016. <https://doi.org/10.1007/s10811-015-0775-2>.

CORDELL, D.; DRANGERT, J. O.; WHITE, S. The story of phosphorus: Global food security and food for thought. *Global Environmental Change*, v. 19, n. 2, p. 292–305, maio 2009.

COSTA, J. A. V.; FREITAS, B. C. B.; CRUZ, C. G.; SILVEIRA, J.; MORAIS, M. G. Potential of microalgae as biopesticides to contribute to sustainable agriculture and environmental development, *Journal of Environmental Science and Health, Part B*.

DAGNAISSER, DOS SANTOS, COSTA, DE CARVALHO, DE MENDONÇA, Laiza, M.G., Anderson, Daniel, Henrique. Microalgas como biofertilizante: uma nova estratégia para o avanço da agricultura moderna, biorremediação de águas residuárias e mitigação de carbono atmosférico. Separata de: AJUZ HOLZMANN, Henrique. ENGENHARIAS: DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS E PRODUTOS. Ponta Grossa-PR: Atena Editora, 2023. cap. Capítulo 13, p. 182 a 198. Disponível em: [file:///C:/Users/User/Desktop/Artigos%20para%20a%20produção%20do%20tcc%20sobre%20biofertilizantes/engenharias-desenvolvimento-de-processos-e-produtos\[1\].pdf](file:///C:/Users/User/Desktop/Artigos%20para%20a%20produção%20do%20tcc%20sobre%20biofertilizantes/engenharias-desenvolvimento-de-processos-e-produtos[1].pdf).

DAGNAISSER, LAIZA SANTOS. Uso da biomassa de microalgas cultivadas em águas residuárias da bovinocultura para produção de rúcula (*Eruca vesicaria* (L.) Cav.), Rio de Janeiro- RJ, p. 1-95, 2023. Disponível em: <file:///C:/Users/User/Desktop/Artigos%20para%20a%20produção%20do%20tcc%20sobre%20>

[Obiofertilizantes/2023%20-%20Laiza%20Santos%20Dagnaisser.pdf](#).

DA SILVA, A. C., dos Santos, A. C., dos ANJOS, S. S. N., ROSADO, T., & JUNGSMANN, L. (2019). Biofertilizantes de microalgas: desafios para uma produção competitiva e sustentável. In: CONGRESSO DA REDE BRASILEIRA DE TECNOLOGIA E INOVAÇÃO DE BIODIESEL, 7., 2019, Florianópolis. Empreendedorismo e inovação: construindo um futuro competitivo para o biodiesel: anais. Florianópolis, SC: Rede Brasileira de Tecnologia e Inovação De Biodiesel, 2019.

DA SILVA, DOS SANTOS, DOS ANJOS, ROSADO, CANÇADO, A.C., A.C., S.S., T.B., e L.J.. Biofertilizantes de microalgas: Desafios para uma produção competitiva e sustentável, Florianópolis- SC, p.1- 2, 2019. Disponível em: [file:///C:/Users/User/Desktop/Artigos%20para%20a%20produção%20do%20tcc%20sobre%20Obiofertilizantes/LETICIASEGBiofertilizantesdemicroalgas%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/User/Desktop/Artigos%20para%20a%20produção%20do%20tcc%20sobre%20Obiofertilizantes/LETICIASEGBiofertilizantesdemicroalgas%20(1).pdf).

DA SILVA, GLÓRIA, PANTA, VIEIRA, Mirella, Jodson, Daniel, Gláucia. Microalgas e a terceira geração de biocombustíveis: desafios atuais e perspectivas futuras. microalgas e a terceira geração de biocombustíveis: desafios atuais e perspectivas futuras, Revista Desafios, v. 1, p. 19, 22 out. 2021. Disponível em: [file:///C:/Users/Bruno/Downloads/guilhermenobre,+11171-Texto+do+artigo-59904-2-11-20211021+\(1\).pdf](file:///C:/Users/Bruno/Downloads/guilhermenobre,+11171-Texto+do+artigo-59904-2-11-20211021+(1).pdf). Acesso em: 21 maio 2024.

DE BIODIESEL, Programa de Pós-Graduação em Biologia Vegetal do Centro de Ciências Humanas e Naturais da Universidade Federal do Espírito Santo, p. 71, 28 fev. 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufes.br/server/api/core/bitstreams/73fccff-1708-422f-8761-86cc5e543d2b/content>. Acesso em: 17 jun. 2024.

DERNER, R. B.; OHSE, S.; VILLELA, M.; CARVALHO, S.; M. DE; FETT, R. Microalgas, produtos e aplicações. Ciência Rural, v. 36 n.6 Santa Maria. 2006;

DE LIRA, EVANDRO BERNARDO. Biodigestor anaeróbico na agricultura familiar: produção de biogás e biofertilizante a partir de resíduos pecuários e implantação de cultivo de microalgas, João Pessoa- PB, p. 1-107, ago. 2021. Disponível em: file:///C:/Users/User/Desktop/Artigos%20para%20a%20produção%20do%20tcc%20sobre%20Obiofertilizantes/EvandroBernardoDeLira_Dissert.pdf.

DE MENDONÇA, H.V.; OMETTO, J.P.H.B.; OTENIO, M.H.; MARQUES, I.P.R.; REIS, A.J.D.R. Microalgae-mediated bioremediation and valorization of cattle wastewater previously digested in a hybrid anaerobic reactor using a photobioreactor: Comparison between batch and continuous operation, Science of The Total Environment, Volume 633, 2018, Pages 1-11, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.157>.

DE MORAIS, M. G.; DE MORAIS, E. G.; DUARTE, J. H.; DEAMICI, K. M.; MITCHELL, B. G.; COSTA J.A.B. Biological CO₂ mitigation by microalgae: technological trends, future prospects and challenges. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 35, 78, 2019.

DE SOUZA, Mauro Henrique Batalha. Aplicação de microalgas no solo para recuperação de nitrogênio: uma abordagem de ciclo de vida, Viçosa-MG, p.1-42, 2019. Disponível em: <file:///C:/Users/User/Desktop/Artigos%20para%20a%20produção%20do%20tcc%20sobre%20Obiofertilizantes/2023%20-%20Laiza%20Santos%20Dagnaisser.pdf>.

[Obiofertilizantes/tese%20Mauro%20microalgas%20recupera%20do%20solo.pdf](#).

DI DOMENICO ZIERO, H. D. D.; BULLER, L. S.; MUDHOO, A.; AMPESE, L. C.; MUSSATTO, S. I.; CARNEIRO, T. F. An overview of subcritical and supercritical water treatment of different biomasses for protein and amino acids production and recovery. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(5), 104406, ISSN 2213-3437, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104406>.

Dourado, M. S., Cardoso, C. C. A., Calado, C. S. C., Frety, R. T. F. & Sales, E. A. (2020). Microalgas como matéria prima para a produção de compostos lipídicos precursores de combustíveis verdes. *Brazilian Journal of Development*, 6(3), 13985-13994. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n3-316>.

EGLE, L.; RECHBERGER, H.; ZESSNER, M. Overview and description of technologies for recovering phosphorus from municipal wastewater, *Resources, Conservation and Recycling*, Volume 105, Part B, 2015, Pages 325-346, ISSN 0921-3449, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.09.016>.

FERNÁNDEZ, F.G.A.; REIS, A.; WIJFFELS, R.H.; BARBOSA, M.; VERDELHO, V.; LLAMAS, B. The role of microalgae in the bioeconomy, *New Biotechnology*, Volume 61, 2021, Pages 99-107, ISSN 1871-6784, <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2020.11.011>.

FERREIRA, FERREIRA, Bruno Luiz de Souza, Flávio André Prata. Estudo do uso de microalgas na agricultura com ênfase em biofertilizantes, UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO CENTRO DE TECNOLOGIA ESCOLA DE QUÍMICA, p. 101, jan. 2023. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/20546/1/BLSFerreira.pdf>

Ferreira, A., Melkonyan, L., Carapinha, S., Ribeiro, B., Figueiredo, D., Avetisova, G., Gouveia, L. (2021). Biostimulant and biopesticide potential of microalgae growing in piggery wastewater. *Environmental Advances*, v. 4, 2021.

GARCIA-GONZALEZ, J.; SOMMERFELD, M. Biofertilizer and biostimulant properties of the microalga *Acutodesmus dimorphus*. *Journal of Applied Phycology*, v. 28, n. s/n, p. 1051–1061, 2016.

Grzesik M, Romanowska- Dua Z, Kalaji HM. Eficácia de cianobactérias e algas verdes no aumento da fotossíntese. Desempenho e crescimento de plantas de salgueiro (*Salix viminalis* L.) sob aplicação limitada de fertilizantes sintéticos. *Fotossintética*. 2017; 55:510-521.

GONZALO, PAUL, YELITZA, ANA G, EDGAR G, JUAN, DUILIO, Soto, Monar, García-Orellana, Simbaña, Tello, Brito Borges, Torres Rodríguez. PROPUESTA DE UN PROTOCOLO PARA LA OBTENCIÓN DE FERTILIZANTE ORGÁNICO A PARTIR DE MICROALGAS, Venezuela, p. 1-18, 2020. Disponível em: <file:///C:/Users/User/Desktop/Artigos%20para%20a%20produ%20do%20tcc%20sobre%20Obiofertilizantes/2834-Texto%20del%20art%20culo-2932-1-10-20201006.pdf>.

GUEDES, WELLINGTON ALVES. Produção de mudas de cultivares de mamoeiro produzidas sob doses de *Spirulina platensis*, Pombal- PB, p. 1-71, 2018. Disponível em: <file:///C:/Users/User/Desktop/Artigos%20para%20a%20produ%20do%20tcc%20sobre%20Obiofertilizantes/WELLINGTON%20ALVES%20GUEDES%20->

[%20DISSERTAÇÃO%20PPGHT%202018.pdf](#).

Guerra, Witter Duarte. "Avaliação do rendimento de biomassa e lipídeos empregando diferentes regimes de cultivo em *Scenedesmus* sp." (2019).

Guerra, Witter Duarte. "Caracterização do sistema de co-cultivo de microalgas e cianobactérias dulcícolas com objetivo de avaliar seu potencial para obtenção de biomassa, óleo, biodiesel in situ e biochar." (2024).

HENRARD, A, S, A; Cultivo semicontínuo das microalgas cyanobium sp. e chlorella sp. Programa de pósgraduação em engenharia e ciência de alimentos, Universidade Federal do Rio Grande - furg escola de química e alimentos, 2009.

HOLANDA, RAMOS, ROCHA, A DA SILVA, Laryssa , Francisco, KARLA, Joyce. O biodiesel de microalgas atuando como complemento ao diesel: uma análise sob a ótica da teoria dos jogos, xxx encontro nacional de engenharia de produção, p. 10, out. 2010. Disponível em: https://abepro.org.br/biblioteca/enegep2010_tn_sto_118_773_16109.pdf. Acesso em: 24 jun. 2024.

HUSSAIN, F.; SHAH, S.Z.; AHMAD, H.; ABUBSHAIT, S.A.; ABUBSHAIT, H.A.; LAREF, A.; MANIKANDAN, A.; KUSUMA, H.S.; IQBAL, M. Microalgae an ecofriendly and sustainable wastewater treatment option: Biomass application in biofuel and bio-fertilizer production. A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 137, 2021, 110603, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110603>.

ILLMAN, A. M; SCRAGG, A. H; SHALES, S. W. Increase in *Chlorella* strains calorific values when grow in low nitrogen medium. *Enzyme and Microbial Technology*, v. 27, p. 631-635, 2000;

Jimenez, R., Markou, G., Tayibi, S., Barakat, A., Chapsal, C., Monlau, F., 2020. Production of microalgal slow-release fertilizer by valorizing liquid agricultural digestate: growth experiments with tomatoes. *Appl. Sci.* 10, 3890. <https://doi.org/10.3390/app10113890>.

KAPOORE, R. V.; WOOD, E. E.; LLEWELLYN, C. A. Algae biostimulants: a critical look at microalgal biostimulants for sustainable agricultural practices. *Biotechnology Advances*, v. 49, n. s/n, p. 107-754, 2021.

KINPARA, D.I. A importância estratégica do potássio para o Brasil. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2003. ISSN 1517-5111. 27p.

Kumar D, Purakayastha TJ, Shivay YS. Efeito de longo prazo de adubos orgânicos e biofertilizantes nas propriedades físicas e químicas do solo e na produtividade do sistema arroz-trigo. *Revista Internacional de Biorrecursos e Gestão do Estresse (IJBSM)*. 2015; 6(2):176-181. DOI: 10.5958/0976-4038.2015.00030.5.

LIMA, J. S. Avaliação econômica das práticas agrícolas: um estudo comparativo de custos na agricultura regenerativa e tradicional no cerrado. 2023. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias - Agronomia) - Instituto Federal Goiano, Rio Verde, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ifgoiano.edu.br/handle/prefix/4307>

LINDBERGH SOUSA, Bruno. Estudo tecnológico de sistemas de cultivo de

microalgas, Rio de Janeiro- RJ, v. 1, p. 68, ago. 2018. Disponível em: https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/21230/1/BLSouza_compressed.pdf. Acesso em: 24 maio 2024.

Lin CS, Chou TL, Wu JT. Biodiversidade de algas do solo nas terras agrícolas do centro de Taiwan. *Bot Stud.* 2013; 54: 41. DOI: 10.1186/1999-3110-54-41

LIRA, Rafael de Araújo. Estudo do rendimento de biomassa da microalga nativa *Chlorella* sp. visando á obtenção de biocombustíveis, Viçosa-MG, p. 1-133, 8 ago. 2011. Disponível em: <file:///C:/Users/User/Desktop/Artigos%20para%20a%20produção%20do%20tcc%20sobre%20biofertilizantes/tese%20de%20microalga%20chlorella%20sp%20Rafael.pdf>.

LORENTZ, J. F., CALIJURI, M. L., ASSEMAN, P. P., ALVES, W. S.; PEREIRA, O. G. Microalgal biomass as a biofertilizer for pasture cultivation: Plant productivity and chemical composition. *Journal of Cleaner Production*, 276, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124130>

LOURENÇO ALVES, AILSON. O CULTIVO DE MICROALGAS E SUAS APLICAÇÕES: Uma revisão da literatura., João Pessoa-PB, v. 1, p. 38, 2021. Disponível em: https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/26423/1/TFC_AILSON%20JOS%20c3%89%20LOUREN%20c3%87O%20ALVES.pdf. Acesso em: 29 maio 2024.

MACHADO, V. J.; SOUZA, C. H. E.; ANDRADE, B. B.; LANA, R. M. Q. Curvas de Disponibilidade de Fósforo em Solos com Diferentes Texturas Após Aplicação de Doses Crescentes de Fosfato Monoamônico. *Bioscience Journal*. Uberlândia, v.27, n.1, p.70-76, 2011.

MANNING, D.A.C. How will minerals feed the world in 2050?, *Proceedings of the Geologists' Association*, Volume 126, Issue 1, 2015, Pages 14-17, ISSN 0016-7878, <https://doi.org/10.1016/j.pgeola.2014.12.005>.

MARTINS, Lorena Borges. Extração integrada de carboidratos e lipídeos para a produção de bioetanol e biodiesel a partir da microalga *Chlorella* sp. 2018.

MAURICIO TARAZONA DELGADO, RONALD. Efeito de depleção de nitrogênio no crescimento, morfologia e composição bioquímica de *Picocystis salinarum* Lewin Como matéria-prima para a produção de biodiesel, Programa de Pós-Graduação em Biologia Vegetal do Centro de Ciências Humanas e Naturais da Universidade Federal do Espírito Santo, p. 71, 28 fev. 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufes.br/server/api/core/bitstreams/73fccfff-1708-422f-8761-86cc5e543d2b/content>. Acesso em: 17 jun. 2024.

MENDES JUNIOR, A. P.; BUENO, O. C. Participação da energia fóssil na produção dos fertilizantes industriais nitrogenados com ênfase na ureia. *Energia Na Agricultura*, 30(442– 447), 2015.

MICHALAK, I.; CHOJNACKA, K. Algae as production systems of bioactive compounds. *Engineering in Life Sciences*, 15, 160–76, 2015.

MIRANDA, Giovanna Lopes de. "Os bioinsumos e a sustentabilidade agrônômica." (2024).

MORENO-GARCIA, L.; ADJALLÉ, K.; BARNABÉ, S.; RAGHAVAN, G.S.V. Microalgae biomass production for a biorefinery system: Recent advances and the way towards sustainability. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v.76, p. 493-506, 2017.

MORENO-GARCIA L.; ADJALLÉ K.; BARNABÉ S; RAGHAVAN G. Microalgae biomass production for a biorefinery system: Recent advances and the way towards sustainability. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Rev;76,:493-506, 2016.

Nagananda, Bhattacharya, S., y Kalpana. (2010). In vitro Studies on the Effects of Biofertilizers(Azotobacter and Rhizobium) on Seed Germination and Development of *Trigonella foenum-graecum* L. using a Novel Glass Marble containing Liquid Medium. *International Journal of Botany*, 394–403.

Notícias Agrícolas. Brasil conquista primeiro registro de biofertilizante. Brasil conquista primeiro registro de biofertilizante, [s. l.], p. 1, 17 dez. 2018. Disponível em: <https://www.noticiasagricolas.com.br/noticias/agronegocio/226995-brasil-conquista-primeiro-registro-de-biofertilizante.html>.

Odjadjare EC, Mutanda T, Olaniran AO. Potencial aplicação biotecnológica de microalgas: uma revisão crítica. *Crit Rev Biotecnologia*. 2017;37(1):37-52. DOI: 10.3109/07388551.2015.1108956

OH-HAMA T, MIYACHI S. Microalgal biotechnology. (Borowitzka MA, Borowitzka LJ, editors) Cambridge University Press, Cambridge, 3-26, 1988;

OHSE, S.; DERNER, R.; OZÓRIO, R. Á. Crescimento de microalgas em sistema autotrófico estacionário. *Biotemas*, v. 21, n. 2, p. 6-18, 2008. <https://doi.org/10.5007/21757925.2008v21n2p7>.

OLIVEIRA, JUNQUEIRA, DOS SANTOS, Rafael Araújo, Daniela Inácio, Rafael Ferreira. Biofertilizantes á base de microalgas testado na germinação de sementes de *Lactuca sativa* L. (ALFACE AMERICANA), [S. l.], p.1-12, 2024. Disponível em: [file:///C:/Users/User/Desktop/Artigos%20para%20a%20produção%20do%20tcc%20sobre%20biofertilizantes/document%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/User/Desktop/Artigos%20para%20a%20produção%20do%20tcc%20sobre%20biofertilizantes/document%20(2).pdf).

ORTIZ-MORENO, SANDOVAL-PARRA, SOLARTE-MURILLO, Martha L, Karen X, Laura V. *Chlorella*, um potencial biofertilizante? Colômbia, p. 1-8, 2019. Disponível em: <file:///C:/Users/User/Desktop/Artigos%20para%20a%20produção%20do%20tcc%20sobre%20biofertilizantes/Chlorella%20português.pdf>.

Ortiz-Moreno ML, Sandoval-Parra KX, Solarte-Murillo LV. *Chlorella*, um potencial biofertilizante? *Orinoquia*, 2020; 23(2):71-78. <http://doi.org/10.22579/20112629.582>

PEREIRA, ANDRÉIA. Potencialidades e aplicações das microalgas, Natal- RN, v. 1, p. 24, Dez, 2022. Disponível em: https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/51215/1/PotencialidadesAplicacoesMicroalgas_Pereira_2022.pdf. Acesso em: 24 maio 2024.

PEREIRA, D.A. Controle da temperatura e irradiância em fotobiorreatores de placas planas para cultivo de microalgas. Salvador. UFBA, 2014.77 p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2014.

PULZ, O.; W. Valuabçe products from biotechnology of microalgae. *Applied Microbiology Biotechnology*, v. 65, p. 635- 648, 2004.

RAMIREZ, Nelzy Neyza Vargas. Estudo do crescimento da microalga *Scenedesmus* sp. em vinhaça. 2013.

RASOUL-AMINI, S.ET AL, chlorella sp. a new strain whith highly saturated fatty acids for biodiesel production in bubble-column photobioreactor. *applied energy* , V. 88,N.10,P.3354-3356,2011.

Redação da Revista MasterPlanti. O que são biofertilizantes e qual o seu impacto no agronegócio? *Revista MasterPlanti*, p. 1, 12 mar. 2024. Disponível em: <https://masterplanti.com.br/o-que-sao-biofertilizantes-e-qual-o-seu-impacto-no-agronegocio/>

RENUKA, N.; GULDHE, A.; PRASANNA, R.; SINGH, P.; BUX, F. Microalgae as multifunctional options in modern agriculture: current trends, prospects and challenges. *Biotechnology Advances*, 36(4), 1255–1273, 2018.

Rizwan M, Mujtaba G, Memon SA, Lee K, Rashid N. Explorando o potencial das microalgas para novas aplicações biotecnológicas e além: uma revisão. *Revista Renovação Sustentável Energética* 2018; 92: 394-404. DOI: 10.1016/j.rser.2018.04.034

Romero Torres, N., SandovalHerrera, J. (2024). Biofertilizante a partir de *Chlorella vulgaris*. *Mutis*, 14(1). 1- 12. <https://doi.org/10.21789/22561498.2048>

Rupawalla, Z., Shaw, L., Ross, I.L., Schmidt, S., Hankamer, B., Wolf, J. (2022). Germination screen for microalgae-generated plant growth biostimulants, *Algal Research*, Volume 66, 2022, 102784, ISSN 2211-9264, <https://doi.org/10.1016/j.algal.2022.102784>.

SALAMA, E. S. HURADE, M. B.; ABOU-SHANAB, R. A.I.; EL-DALATONY, M. M.; YANG, I. S.; MIN, B.; JEON, B. H. Recent progress in microalgal biomass production coupled with wastewater treatment for biofuel generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 79, n. May, p. 1189-1211, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.091>

SANCHEZ CABRAL, KEILA PRISCILA. Evaluación del potencial biofertilizante y bioestimulante de biomasa de microalgas cultivadas en agua residual urbana., Valência, p.1-56, jul. 2024. Disponível em: <file:///C:/Users/User/Desktop/Artigos%20para%20a%20produção%20do%20tcc%20sobre%20Biofertilizantes/Sanchez%20-%20Evaluacion%20del%20potencial%20biofertilizante%20y%20bioestimulante%20de%20biomasa%20de%20microalgas%20cult....pdf>.

SANTOS DAGNAISSER, LAIZA. Uso da biomassa de microalgas cultivadas em águas residuárias da bovinocultura para produção de rúcula (*Eruca vesicaria* (L.) Cav.), Rio de Janeiro, Brasil, p. 95, 2023. Disponível em: <https://rima.ufrj.br/jspui/bitstream/20.500.14407/13315/3/2023%20-%20Laiza%20Santos%20Dagnaisser.pdf>. Acesso em: 14 nov. 2024.

SHAKEEL A. KHAN, Microalgae based biofertilizers: A biorefinery approach to phycoremediate wastewater biodiesel and manure, 2018

SILVA, A. C., SANTOS, A. C., ANJOS, S., ROSADO, T., & CANÇADO, L. (2019).

Biofertilizantes de microalgas: Desafios para uma produção competitiva e sustentável. VII Congresso da Rede Brasileira de Tecnologia e Inovação de Biodiesel. Florianópolis, SC.

SILVA, K. (2020). Produção de rabanete com diferentes tipos de adubações orgânicas. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Cesumar – Unicesumar de Maringá – PR.

SILVA, A. C. M. da. "Biofertilizantes: estudo de opinião, tendência das pesquisas e legislação brasileira." (2021).

SIQUEIRA, F. Biocombustíveis Provenientes de Microalgas: Uma Revisão sobre métodos de cultivo e extração de óleo, Revista Brasileira de Energia, p. 23, 2017. Disponível em: <file:///C:/Users/Bruno/Downloads/391-Texto%20do%20artigo-368-1-10-20180423.pdf>. Acesso em: 24 jun. 2024.

SIPERT, S., COHIM, E. & DO NASCIMENTO, F.R.A. Identification and quantification of main anthropogenic stocks and flows of potassium in Brazil. Environ Sci Pollut Res 27, 32579– 32593, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09526-1>.

SOARES, OLIVEIRA, LACERDA, MARQUES, MOREIRA, Antônio Gabriel Lessa, Adna Caroline Vale, Eliseu Melo Carvalho, Isadora Machado, Ícaro Thiago Andrade. Avaliação da biomassa de microalgas cultivadas em água residual em visitas á produção de biofertilizante para agricultura familiar, Belém- PA, p. 1-11, 2019. Disponível em: <file:///C:/Users/User/Desktop/Artigos%20para%20a%20produção%20do%20tcc%20sobre%20biofertilizantes/jclarisse1,+4.pdf>.

SOUZA, F. P.; CASTILHO, T. P. R.; MACEDO, L. O. B. An institutional framework for bioinputs in Brazilian agriculture based on ecological economics. Sustainability in Debate, v. 13, n. 1, p. 266-285, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.31501/ealr.v12i3.12811>.

SPOLAORE, P.; JOANNIS-CASSAN, C.; DURAN, E. (2006). Review: commercial applications of microalgae. Journal of Bioscience and Bioengineering, v. 101, n. 2, p. 87–96

SUGANYA T, VARMAN M, MASJUKI H, RENGANATHAN S. Macroalgae and microalgae as a potencial source for commercial applications along with biofuels production: a biorefinery approach. Renew Sustain Energy Rev;55:909-41. 2017

SULEIMAN, A.K.A., LOURENÇO, K.S., CLARK, C., LUZ, R.L., DA SILVA, G.H.R., VET, L.E.M., CANTARELLA, H., FERNANDES, T.V., KURAMAE, E.E., 2020. From toilet to agriculture: fertilization with microalgal biomass from wastewater impacts the soil and rhizosphere active microbiomes, greenhouse gas emissions and plant growth. Resour. Conserv. Recycl. 161, 104924 <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104924>.

SUNDA, W.G., PRINCE, N, M, & MOREL, F.M.M. 2005. Trace metal ion bufferes and their use in culture studies. In Algal Culturing Techniques (R.A. Andersen, ed.) Elsevier Academic Press, London, p.35-64.

SUPRAJA, K. V.; BEHERA, B.; BALASUBRAMANIAN, P. Efficacy of microalgal extracts as biostimulants through seed treatment and foliar spray for tomato cultivation. Industrial Crops and Products, v. 151, n. 1, p. 112-453, 2020.

STEWART, W. M.; DIBB, D. W.; JOHNSTON, A. E.; SMYTH, T. J. The contribution of commercial fertilizer nutrients to food production. *Agronomy Journal*. v. 97, n. 1, p. 1-6, 2005.

STIRK AND VAN STADEN, *Seaweed Products as Biostimulants in Agriculture*". World Seaweed Resources, 2006

STIRK, W. A.; ÖRDÖG, V.; VAN STADEN, J. J.; AGER, K. Cytokinin- and auxin-like activity in Cyanophyta and microalgae. *Journal of Applied Phycology*, 14, 215–221, 2022.

TARAKHOVSKAYA, E.R., MASLOV, Y.I., SHISHOVA, M.F. Phytohormones in algae. *Russian Journal of Plant Physiology*. 2007; 54: 163-170. <https://doi.org/10.1134/S1021443707020021>.

TRIPATHI, R.D., DWIVEDI, S., SHUKLA, M.K., MISHRA, S., SRIVASTAVA, S., SINGH, R. Papel de biofertilizante de algas verde-azuladas na melhoria da demanda de nitrogênio e do estresse por cinzas volantes no crescimento e na produtividade de plantas de arroz (*Oryza Sativa L.*) *Quimosfera*. 2008;70: 1919- 1928. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2007.07.038

USGS. United States Geological Survey. Mineral commodity summaries 2022: U.S. Geological Survey, 202 p., 2022, <https://doi.org/10.3133/mcs2022>.

WANG, S.K., HU, Y.R., WANG, F., STILES, A.R., LIU, C.Z. Cultivo em larga escala de *Chlorella ellipsoidea* de ambientes internos para externos em biorreatores de coluna de bolhas. *Tecnologia de Biorecursos*. 2014; 156: 117-122.

WATANABE A. List of algal strains in the collection at the Institute of Applied Microbiology, University of Tokyo. *The Journal of General and Applied Microbiology*, 6:283-92, 1960;

WOJCIECHOWSKI, Juliana. **Isolamento e cultivo de microalgas**, Paraná, p. 91, set. 2013. Disponível em: <file:///C:/Users/User/Downloads/ApostilaIsolamentoeCultivodeCianobactrias.pdf>. Acesso em: 28 abr. 2025.

ZHUANG, W.W., DOWNING, A., ZHANG, Y.M. A influência da crosta biológica do solo na translocação de ¹⁵N no solo e nas plantas vasculares em um deserto temperado do noroeste da China. *J Planta Ecol*. 2014; 8:1-9.

ZWETSLOOT, M. J.; LEHMANN, J.; SOLOMON, D. Recycling slaughterhouse waste into fertilizer: how do pyrolysis temperature and biomass additions affect phosphorus availability and chemistry? *Journal of the Science of Food and Agriculture*, v. 95, n. 2, p. 281-288, 2015.