

UNIVERSIDADE DE SOROCABA
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PROCESSOS TECNOLÓGICOS E
AMBIENTAIS

SIMONE DA SILVA SANTOS

Dunaliella salina: **SÍNTESE DE NANOPARTÍCULAS BIOGÊNICAS E SEUS**
EFEITOS NO SEQUESTRO DE CO₂ E EFEITOS BIOESTIMULANTES EM
FEIJOEIRO (*Phaseolus vulgaris*) E TOMATEIRO (*Solanum lycopersicum*)

Sorocaba/SP

2026

Simone Da Silva Santos

***Dunaliella salina*: SÍNTESE DE NANOPARTÍCULAS BIOGÊNICAS E SEUS
EFEITOS NO SEQUESTRO DE CO₂ E EFEITOS BIOESTIMULANTES EM
FEIJOEIRO (*Phaseolus vulgaris*) E TOMATEIRO (*Solanum lycopersicum*)**

Dissertação apresentada à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Processos Tecnológicos e Ambientais da Universidade de Sorocaba, como exigência parcial para obtenção do título de Mestre em Processos Tecnológicos e Ambientais.

Orientador: Prof.^a Dra. Renata de Lima

**Sorocaba/SP
2026**

Simone Da Silva Santos

Dunaliella salina: **SÍNTESE DE NANOPARTÍCULAS BIOGÊNICAS E SEUS EFEITOS NO SEQUESTRO DE CO₂ E EFEITOS BIOESTIMULANTES EM FEIJOEIRO (*Phaseolus vulgaris*) E TOMATEIRO (*Solanum lycopersicum*)**

Dissertação apresentada à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Processos Tecnológicos e Ambientais da Universidade de Sorocaba, como exigência parcial para obtenção do título de Mestre em Processos Tecnológicos e Ambientais.

Aprovado em: 02/03/2026

BANCA EXAMINADORA:

Prof.^a Dra. Renata de Lima

Universidade de Sorocaba- Uniso

Prof. Dr. Eduardo Roberto De Almeida Bernardo

Universidade Estadual Paulista - Júlio de Mesquita Filho- Unesp

Prof. Dr. Thomaz Augusto Guisard Restivo

Universidade de Sorocaba- Uniso

Ficha Catalográfica

Santos, Simone da Silva
S238d Dunaliella salina : síntese de nanopartículas e seus efeitos no sequestro de CO₂ e efeitos bioestimulantes em feijoeiro (*Phaseolus vulgaris*) e tomateiro (*Solanum lycopersicum*) / Simone da Silva Santos. – 2026.
57 f. : il.

Orientadora: Profa. Dra. Renata Lima
Dissertação (Mestrado em Processos Tecnológicos e Ambientais) –
Universidade de Sorocaba, Sorocaba, SP, 2026.

1. Nanopartículas. 2. Biomassa. 3. Sequestro de carbono. 4. *Solanum lycopersicum*. 5. *Phaseolus*. I. Lima, Renata, orient. II. Universidade de Sorocaba. III. Título.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por iluminar meu caminho, fortalecer minha fé e me abençoar durante toda essa jornada.

À minha família, em especial aos meus pais, Adonias e Noemia, minha eterna gratidão. Obrigada por compreenderem minhas ausências e por nunca medirem esforços para que este sonho se tornasse realidade. O amor, o carinho e a fé de vocês foram meu alicerce.

À minha irmã Silmara, por estar sempre ao meu lado, com apoio, paciência e palavras que me deram força nos momentos em que eu mais precisei, e aos meus irmãos Fagno e José, meu agradecimento especial pela companhia, carinho e incentivo ao longo desta jornada.

Agradeço à PRIOBIO e a Funadesp, pela bolsa de mestrado (Processo nº 7900113) e apoio financeiro, e a confiança depositada no meu trabalho.

Agradeço a Universidade de Sorocaba (UNISO) e ao Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba (UNESP), pelo espaço e os equipamentos, utilizados no desenvolvimento da pesquisa.

À minha orientadora, Prof.^a Dr.^a Renata de Lima, meu sincero agradecimento pela orientação atenta, pelo incentivo constante e pelo apoio em cada etapa deste percurso. Muito obrigada por acreditar em mim!

Aos colegas do grupo de pesquisa do Laboratório de Avaliação de Biomateriais e Toxicologia de Nanomateriais (LABITON), meu carinho especial: Júlia Garcia, Vitória Antunes, Natália Bilesky-José, Tais Germano-Costa, Liliam Harada e Jennifer Gabaldo: obrigada pelas trocas, pelos eventos, pelas risadas, pelos abraços e por tornarem essa caminhada mais leve e acolhedora.

Aos meus amigos e amigas, antigos e novos, e aos meus primos e primas, em especial Guilherme, Joana e Julia, agradeço por cada palavra de apoio, cada conversa, cada momento de leveza e alegria. Compartilhar esta etapa com vocês tornou tudo mais especial e significativo.

E, por fim, dedico um agradecimento silencioso e cheio de amor ao meu querido gatinho Radesh, que partiu durante esse período. Sua presença doce foi um conforto nos meus dias, e sua ausência deixa saudade. Obrigada por ter me acompanhado com tanto afeto.

RESUMO

As microalgas, especialmente *Dunaliella salina*, são fontes promissoras de biomassa devido à sua alta produtividade e capacidade de crescer em uma variedade de condições, incluindo águas residuais e ambientes desfavoráveis à agricultura convencional. Devido a isto, os biofertilizantes de microalgas são estudados como método sustentável para substituir os fertilizantes químicos tradicionais. Além disto, o sequestro de CO₂ através de microalgas é uma estratégia para reduzir as emissões industriais de carbono, destacando a necessidade de energia renovável e nutrientes acessíveis para otimizar a eficiência. Desta maneira as microalgas são utilizadas na agricultura como recurso para melhorar o crescimento das plantas, fornecer nutrientes e atuar como agentes de biocontrole. Neste estudo nanopartículas de prata (AgNPs), zinco (ZnNPs) e titânio (TiNPs) foram sintetizadas utilizando o microrganismo *D. salina* como agente estabilizador, os precursores metálicos empregados foram nitrato de prata (AgNO₃), acetato de zinco diidratado (C₄H₆O₄Zn·2H₂O) e isopropóxido de titânio (C₁₂H₂₈O₄Ti), todos na concentração de 1 mM. Após a síntese foi realizada a caracterização físico-química das nanopartículas por espalhamento dinâmico de luz (DLS), microeletroforese e rastreamento de nanopartículas (NTA). As nanopartículas NP_{Ag} apresentaram um diâmetro médio de 84,12 ± 1,05 nm, potencial zeta de - 4,78 ± 4,053 mV, índice de polidispersão de 0,232 ± 0,017 e concentração de 2,85 x 10⁹ NPs/mL, as NP_{Zn}, diâmetro médio 84,81 ± 23,10 nm, potencial zeta de - 2,44 ± 0,606 mV, índice de polidispersão de 0,917 ± 0,142 e concentração de 2,75 x 10⁹ NPs/mL e a NP_{Ti}, diâmetro médio de 165 ± 1,91 nm, potencial zeta de -2,44 ± 4,884 mV, índice de polidispersão de 0,234 ± 0,08 e concentração de 2,50x 10⁹ NPs/mL. Os resultados das análises de germinação *in vitro* utilizando sementes de feijão carioca (*Phaseolus vulgaris*) e tomate cereja (*Solanum lycopersicum*), mostraram que as nanopartículas influenciaram o crescimento radicular de maneira distinta, indicando que as NPs em concentrações menores apresentam aumento no comprimento das raízes em comparação com o controle. A determinação de crescimento das microalgas a partir das NPs foi determinada por densidade óptica em leitor de microplacas em absorbância a 600 nm, onde, foi possível observar crescimento na exposição de NP_{Ti}. Logo, a síntese biogênica de NPs por *D. salina* mostrou-se promissora, e auxiliando na germinação de sementes. Além disso, verificou-se aumento significativo na biomassa e na taxa de fixação de CO₂ nos cultivos enriquecidos com 5% de CO₂, evidenciando a eficiência de *D. salina* na captura de carbono. Os resultados reforçam o potencial da microalga como insumo sustentável para a agricultura e sua contribuição para a mitigação das emissões de CO₂, novos estudos devem ser conduzidos com o intuito de aprimorar as propriedades do material final, assegurando sua segurança e eficácia.

Palavras-chaves: *Dunaliella salina*, nanopartículas, biomassa, sequestro de CO₂, estimulação de crescimento, tomateiro, feijoeiro e biofertilizantes.

ABSTRACT

Microalgae, especially *Dunaliella salina*, are promising biomass sources due to their high productivity and ability to grow in a variety of conditions, including wastewater and environments unfavorable to conventional agriculture. Because of this, microalgae biofertilizers are being studied as a sustainable method to replace traditional chemical fertilizers. Furthermore, CO₂ sequestration through microalgae is a strategy to reduce industrial carbon emissions, underscoring the need for renewable energy and readily available nutrients to optimize efficiency. In this way, microalgae are used in agriculture as a resource to improve plant growth, provide nutrients, and act as biocontrol agents. In this study, silver nanoparticles (AgNPs), zinc nanoparticles (ZnNPs), and titanium nanoparticles (TiNPs) were synthesized using the microorganism *D. salina* as a stabilizing agent. The metallic precursors employed were silver nitrate (AgNO₃), zinc acetate dihydrate (C₄H₆O₄Zn·2H₂O), and titanium isopropoxide (C₁₂H₂₈O₄Ti), all at a concentration of 1 mM. After synthesis, the nanoparticles were characterized by dynamic light scattering (DLS), microelectrophoresis, and nanoparticle tracking analysis (NTA). The NP_{Ag} nanoparticles presented an average diameter of 84.12 ± 1.05 nm, a zeta potential of -4.78 ± 4.053 mV, a polydispersity index of 0.232 ± 0.017, and a concentration of 2.85 × 10⁹ NPs/mL; the NP_{Zn} nanoparticles had an average diameter of 84.81 ± 23.10 nm, a zeta potential of -2.44 ± 0.606 mV, a polydispersity index of 0.917 ± 0.142, and a concentration of 2.75 × 10⁹ NPs/mL. The NP_{Ti} nanoparticles had an average diameter of 165 ± 1.91 nm, a zeta potential of -2.44 ± 4.884 mV, and a polydispersity index of 0.234 ± 0.08. A concentration of 2.50 × 10⁹ NPs/mL was used. Results from in vitro germination analyses using carioca bean (*Phaseolus vulgaris*) and cherry tomato (*Solanum lycopersicum*) seeds showed that the nanoparticles influenced root growth in distinct ways, indicating that NPs at lower concentrations showed an increase in root length compared to the control. The growth of microalgae exposed to NPs was determined by measuring absorbance at 600 nm in a microplate reader, with growth observed upon exposure to TiNPs. Therefore, the biogenic synthesis of NPs by *D. salina* proved promising, aiding in seed germination. Furthermore, a significant increase in biomass and CO₂ fixation rate was observed in cultures enriched with 5% CO₂, highlighting *D. salina's* efficiency in carbon capture. The results reinforce the potential of microalgae as a sustainable input for agriculture and their contribution to mitigating CO₂ emissions; further studies should be conducted to improve the properties of the final material, ensuring its safety and effectiveness.

Keywords: *Dunaliella salina*, nanoparticles, biomass, CO₂ sequestration, growth stimulation, tomato, common bean, and biofertilizers.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Nações Unidas do Brasil
BDA	Ágar Batata Dextrose
PGPR	As Rizobactérias Promotoras de Crescimento Vegetal
CO ₂	Dióxido De Carbono
GEE	Gases de Efeito Estufa
EPA	Ácido Eicosapentaenoico
NPs	Nanopartículas
Ag	Prata
Ti	Titânio
Zn	Zinco
AgNPs	Nanopartículas de Prata
ZnNPs	Nanopartículas de Zinco
TiNPs	Nanopartículas de Titânio
DLS	Espalhamento Dinâmico De Luz
FTIR	Espectroscopia No Infravermelho Com Transformada De Fourier
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
NTA	Rastreamento de Nanopartículas
BMAK	Banco de Microrganismos Aidar & Kutner
PDI	Índice de Polidispersão
pH	Potencial Hidrogeniônico
ATR	Reflectância Total Atenuada
DO	Densidade Óptica
C	Carbono
O	Oxigênio
NH ₂	Grupo amino
SH	Tioalcoóis
N-H	Grupo Amina
C=O	Grupo Carbonila
C-O	Ácido Carboxílico
O-H	Hidroxila
C-H	Grupos Metileno
NP. mL	Nanopartículas por Mililitro
Cm	Centímetros
PSU	Escala Prática de Salinidade

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Análise termogravimétrica de quantificação de carbono fixo na biomassa.	243
Figura 2 - Esquema proposto para a síntese das nanopartículas obtidas neste estudo.	244
Figura 3 - Fases de transformação da cultura de microalgas e de NPs A : Cultura de microalgas B : Nanopartículas de isopropóxido de titânio ($C_{12}H_{28}O_4Ti$) na concentração de 1 mM (TiNPs); C : Nanopartículas de nitrato de prata ($AgNO_3$), na concentração de 1 mM (AgNPs); e D : Nanopartículas de acetato de zinco diidratado ($C_4H_6O_4Zn \cdot 2H_2O$), na concentração de 1 mM (ZnNPs).	2929
Figura 4 - Espectro infravermelho obtido para as nanopartículas biogênicas: nanopartículas de nitrato de prata ($AgNO_3$) AgNPs, nanopartículas de acetato de zinco diidratado ($C_4H_6O_4Zn \cdot 2H_2O$) ZnNPs, e nanopartículas de isopropóxido de titânio ($C_{12}H_{28}O_4Ti$) TiNPs e o filtrado a partir de <i>Dunaliella salina</i> utilizado para a síntese das nanopartículas.	311
Figura 5 - Crescimento de <i>Dunaliella salina</i> monitorado pela densidade óptica a 600 nm durante 7 dias de cultivo, sob diferentes concentrações de nanopartículas: (A) AgNPs; (B) ZnNPs e (C) TiNPs.....	335
Figura 6 - Avaliação do crescimento e da germinação, e a comparação do tamanho médio da (A) parte aérea e (B) das raízes do feijão carioca. A diferença significativa considerada é $p < 0,05$	355
Figura 7 - Avaliação do crescimento e da germinação, e a comparação do tamanho médio da (A) parte aérea e (B) das raízes do tomate-cereja. A diferença significativa considerada é $p < 0,05$	37
Figura 8 - Análises morfológicas das plantas de feijão carioca (<i>Phaseolus vulgaris</i>) expostas às nanopartículas; (A) Massa fresca da parte aérea e da raiz, (B) Massa seca da parte aérea e da raiz, (C) Área foliar, (D) Comprimento da parte aérea e da raiz. A diferença significativa considerada é $p < 0,05$	39
Figura 9 - Análises morfológicas das plantas de Tomate cereja (<i>Solanum lycopersicum</i>) expostas às Nanopartículas; (A) Massa fresca da parte aérea e da raiz, (B) Massa seca da parte aérea e da raiz, (C) Área foliar, (D) Comprimento da parte aérea e da raiz. A diferença significativa considerada é $p < 0,05$	411

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	13
2.1 Agronegócio Brasileiro.....	13
2.2 Microalgas	14
2.3 Características Fisiologia de <i>Dunaliella salina</i>	15
2.4 Sequestro de dióxido de carbono (CO ₂)	16
2.5 Microalgas na Agricultura	17
2.6 Nanotecnologia, nanopartículas na área agrícola	19
2.7 Síntese biogênicas de nanopartículas metálicas (Ag, Zn e Ti) utilizando microalgas....	20
3 OBJETIVOS.....	21
3.1 Objetivo Geral	21
3.2 Objetivos Específicos	21
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	22
4.1 Material.....	22
4.1.1 Meio de cultura	22
4.2 Método.....	22
4.2.1 Sequestro de CO ₂ por microalga.....	22
4.2.2 Análise Termogravimétrica para Determinação de Carbono Fixo em <i>D. salina</i>	23
4.2.3 Síntese das nanopartículas	24
4.2.4 Caracterização físico-química das nanopartículas.....	25
4.2.5 Determinação do Crescimento da microalga.....	25
4.2.6 Avaliação de germinação e crescimento sementes de feijoeiro (<i>Phaseolus vulgaris</i>) e tomateiro (<i>Solanum lycopersicum</i>) em exposição às nanopartículas	26
4.2.7 Análise Estatística dos Resultados	26
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	27
5.1 Sequestro de CO ₂ <i>D. salina</i>	27
5.1.2 Análise Termogravimétrica para Determinação de Carbono Fixo em <i>D. salina</i>	27
5.2 Síntese e Caracterização das nanopartículas das microalgas <i>Dunaliella salina</i>	29
5.2.1 Tamanho, polidispersão e potencial zeta.....	29
5.2.2 Análise de FTIR.....	31
5.3 Determinação do Crescimento das microalgas a partir das nanopartículas.....	33
5.4 Avaliação de Germinação e Crescimento em Exposição às Nanopartículas.....	35
5.4.1 Germinação após exposição às nanopartículas.....	35
5.4.2 Crescimento após exposição às nanopartículas	38
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	42
7 CONCLUSÃO.....	43
8 REFERÊNCIAS	44

1 INTRODUÇÃO

O agronegócio brasileiro constitui um pilar central da economia nacional, influenciando diretamente o desempenho macroeconômico, a geração de renda e emprego, a balança comercial e a segurança alimentar global. Estudos recentes indicam que o setor representa cerca de 30% do Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro, sendo responsável por uma expressiva parcela das exportações do país, especialmente de produtos como soja, carnes, açúcar, café e celulose (CEPEA, 2021).

Avanços em tecnologia agrícola, práticas de manejo e maior eficiência no uso da terra têm permitido que a produção agrícola brasileira cresça de forma mais acelerada do que a expansão da área plantada. Dados históricos indicam que, entre 1975 e 2017, a produção de grãos no país aumentou mais de seis vezes, enquanto a área cultivada pouco mais que dobrou, evidenciando ganhos substanciais de produtividade e consolidando o Brasil como um dos maiores produtores mundiais (EMBRAPA, 2018; CONAB, 2024; Vieira Filho, 2024).

Estudos preveem que, em 2050, a população humana pode chegar a 8 bilhões, podendo alcançar 10 bilhões de pessoas nos próximos 50 anos (Kumar *et al.*, 2018; Prosekov *et al.*, 2018). Logo, o desenvolvimento tecnológico nesta área passa a ser uma necessidade, sendo imprescindíveis estratégias que contornem estes problemas, como a resistência a fitopatógenos, a competição com plantas daninhas e a fertilização do solo, tudo visando à melhor conservação do ambiente e à prática de uma agricultura sustentável. Esta necessidade é iminente e alinha-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, incluindo Água Limpa, Saneamento, Ação Climática, Vida Abaixo da Água, Vida em Terra e Fome Zero (Randers *et al.*, 2019).

Uma das estratégias adotadas para suprir essas necessidades é o uso de fertilizantes à base de microrganismos, os quais vêm sendo amplamente estudados visando à substituição parcial ou total dos fertilizantes químicos convencionais, que podem provocar alterações na microbiota benéfica do solo e a contaminação de aquíferos por lixiviação de nutrientes (Meena *et al.*, 2020). Esses fertilizantes microbianos, também denominados biofertilizantes, incluem diferentes grupos funcionais de microrganismos, como os fixadores de nitrogênio, os solubilizadores de fósforo e os produtores de fitormônios, capazes de atuar diretamente na nutrição vegetal e no desenvolvimento das plantas (Bashan *et al.*, 2014).

A produção sustentável de alimentos é uma das questões centrais da bioeconomia contemporânea, uma vez que o aumento da demanda alimentar precisa ser conciliado com a preservação dos recursos naturais e a mitigação dos impactos ambientais da agricultura. Nesse

contexto, torna-se essencial o desenvolvimento de novas práticas agrícolas baseadas na eficiência do uso de bioinsumos, na economia circular e na redução da dependência de produtos químicos convencionais (Trigo *et al.*, 2023). Assim, cresce o interesse por alternativas biotecnológicas que promovam o equilíbrio entre produtividade e sustentabilidade, como o uso de biofertilizantes e biostimulantes derivados de microalgas e cianobactérias, capazes de reduzir a aplicação de fertilizantes sintéticos e melhorar a qualidade do solo (Ghosh *et al.*, 2022; Ramakrishnan *et al.*, 2023; Álvarez-Gil *et al.*, 2023).

Estudos demonstram que a aplicação de microrganismos associados às plantas constitui uma alternativa ecológica e sustentável, destacando-se especialmente as rizobactérias promotoras de crescimento vegetal (PGPR), reconhecidas por seus efeitos positivos no crescimento das plantas, no aumento da absorção de nutrientes e na proteção contra patógenos (Nazari *et al.*, 2020; Meena *et al.*, 2020). Microrganismos como *Azospirillum*, *Bacillus*, *Pseudomonas* e *Rhizobium* são amplamente utilizados como inoculantes agrícolas, contribuindo para a redução do uso de fertilizantes nitrogenados e fosfatados de origem sintética (Hungria *et al.*, 2015).

Nesse contexto, as microalgas surgem como uma alternativa complementar e promissora aos biofertilizantes microbianos tradicionais, uma vez que apresentam elevada capacidade de fornecer macro e micronutrientes, além de compostos bioativos, como aminoácidos, vitaminas, polissacarídeos e fitormônios naturais (Kapoor *et al.*, 2022). A aplicação de biomassa microalgal ou de seus extratos tem demonstrado potencial para estimular a germinação, o crescimento radicular e o acúmulo de biomassa vegetal, além de favorecer a atividade microbiológica do solo (Battista *et al.*, 2021). Dessa forma, as microalgas podem substituir parcialmente fertilizantes químicos, especialmente os nitrogenados, ao mesmo tempo em que atuam como bioestimulantes, promovendo interações sinérgicas com microrganismos do rizossistema e contribuindo para sistemas agrícolas mais sustentáveis (Bashan *et al.*, 2014; Kapoor *et al.*, 2022).

Entre os microrganismos que estão sendo estudados, as microalgas se apresentam como uma das soluções mais promissoras para produção de biofertilizantes, não apenas pela produção de biomassa de valor agregado em grande escala, mas também pelo fato de converterem biologicamente a energia solar e gases, fazendo sequestro de dióxido de carbono, além de apresentarem outras inúmeras características positivas, como sua universalidade, fluxo metabólico acelerado, curto tempo de geração, conversão de nitrogênio biologicamente benigno, através da fixação de nitrogênio e disponibilidade de fósforo e potássio (Alvarez *et al.*, 2021; Ghosh *et al.*, 2022; Win *et al.*, 2018).

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Agronegócio Brasileiro

O agronegócio brasileiro ocupa posição estratégica no cenário agrícola mundial, destacando-se tanto pela extensão da área cultivada quanto pelos elevados níveis de produtividade e volume de produção. O setor constitui um dos principais pilares da economia nacional e desempenha papel essencial na segurança alimentar global. O Brasil figura entre os maiores produtores e exportadores mundiais de soja, exercendo papel central no abastecimento internacional dessa commodity amplamente utilizada na alimentação humana, animal e na produção de biocombustíveis (FAO, 2023; USDA, 2024). O país também mantém, historicamente, a posição de maior produtor e exportador de café do mundo, além de integrar o grupo dos três maiores produtores globais de milho, ao lado dos Estados Unidos e da China (CONAB, 2024; USDA, 2024).

No segmento de fibras agrícolas, o Brasil destaca-se como um dos principais produtores e exportadores mundiais de algodão, resultado do avanço tecnológico, do aumento da produtividade e da expansão de áreas altamente mecanizadas, especialmente na região do Cerrado (CONAB, 2024; Embrapa, 2023). Ademais, o país apresenta forte relevância na fruticultura, sendo o maior produtor mundial de laranja e um dos principais produtores de frutas tropicais, como banana, mamão e manga, reforçando a diversidade agrícola nacional e o potencial de agregação de valor às cadeias produtivas (FAO, 2023; IBGE, 2024; Abrafrutas, 2023). Em termos de uso da terra, o Brasil possui uma das maiores áreas agrícolas do mundo, com mais de 90 milhões de hectares cultivados, distribuídos entre grãos, fibras, oleaginosas e culturas perenes, com crescimento da produção baseado principalmente em ganhos de produtividade (IBGE, 2024; Vieira Filho, 2024).

Esse protagonismo amplia a responsabilidade do país na adoção de sistemas produtivos mais sustentáveis, estimulando o desenvolvimento e a aplicação de tecnologias inovadoras, como biofertilizantes à base de microrganismos e microalgas, além da nanotecnologia agrícola, capazes de reduzir impactos ambientais e aumentar a eficiência no uso de recursos naturais (Embrapa, 2023; Gagliardi, 2023; Barbosa, 2023).

No entanto, tem sido observado um crescente interesse nos derivados de microalgas, que incluem fitormônios e compostos semelhantes a hormônios, como auxinas, citocininas, giberelinas e ácido abscísico. Além disso, oligossacarídeos e polissacarídeos, como os sulfatados e exopolissacarídeos, e compostos fenólicos com notável atividade antioxidante, também são de grande relevância (Gheda *et al.*, 2015; Mazhar *et al.*, 2013). Estudos conduzidos

por Stadnik *et al.* (2014) demonstraram que esses compostos apresentam elevado potencial para promover o crescimento vegetal, aumentar a absorção de nutrientes e induzir maior tolerância a estresses abióticos, como seca, salinidade e estresse oxidativo, bem como a estresses bióticos, incluindo a resistência a fitopatógenos.

2.2 Microalgas

As microalgas são seres microscópicos unicelulares que realizam fotossíntese, vivem em ambientes aquáticos ou em solo úmido, são eucariotos e clorófitos (Hadi *et al.*, 2015; Yarnold *et al.*, 2019). Elas desempenham um papel importante como fonte para a síntese de diversos produtos biológicos, incluindo combustíveis, cosméticos, ração animal e suplementos alimentares (Chan *et al.*, 2022). Portanto, representam fontes promissoras de nutrientes e compostos bioativos, proporcionando benefícios potenciais para a nutrição humana, a agricultura sustentável e as indústrias relacionadas (Gitau *et al.*, 2021; Jesus 2020; Youssef *et al.*, 2022).

No entanto, ainda existem problemas a serem superados, como a eficiência de produção e a conversão de biomassa, fontes de nutrientes limitadas ou dispendiosas, elevado consumo de energia e custos elevados de produção e de industrialização. Entre os pontos positivos, temos a possibilidade de coleta e processamento contínuos da biomassa, o que favorece a produção integrada e sequencial de diversos produtos. Desta maneira, existem várias iniciativas em curso que buscam integrar a produção e o processamento de microalgas em diferentes áreas, como as de alimentos, ambientais e agropecuárias (Alvarez *et al.*, 2021; Puglisi *et al.*, 2018; Sharma *et al.*, 2014).

Outro fator positivo é a boa combinação entre produção de biocombustíveis e auxílio em tratamento ambiental, que torna as microalgas um alvo de estudos que visam impulsionar a bioeconomia, além de serem as principais produtoras de oxigênio atmosférico, produzirem elevado teor de lipídeos ou amido que pode ser aproveitado na produção de biodiesel ou etanol, respectivamente (Cuellar-Bermudez *et al.*, 2015; Lozano-Garcia *et al.*, 2019; Rezvani *et al.*, 2020).

A espécie *Dunaliella salina* é uma microalga que tem despertado considerável interesse devido às suas propriedades nutricionais e à sua aplicação industrial. Por outro lado, é uma microalga halofílica, conhecida por prosperar em ambientes de alta salinidade e por produzir beta-caroteno sob condições de estresse salino, o que a torna uma fonte valiosa desse precursor da vitamina A (Gitau *et al.*, 2021; Jesus, 2020; Youssef *et al.*, 2022).

2.3 Características Fisiologia de *Dunaliella salina*

Dunaliella salina é uma microalga verde unicelular do filo *Chlorophyta*, reconhecida por sua notável habilidade de sobreviver e crescer em ambientes de alta salinidade, sendo considerada um modelo biológico para estudos de halotolerância e de estresse osmótico (Hyršlova *et al.*,2022; Mawed *et al.*,2022). Um dos principais mecanismos fisiológicos que permitem a adaptação de *D. salina* a ambientes hipersalinos é a osmorregulação via acúmulo de glicerol intracelular, que atua como soluto compatível para equilibrar a pressão osmótica entre a célula e o meio externo, garantindo a manutenção da integridade celular mesmo em salinidades extremas (Borovkov *et al.*,2022).

Outro destaque fisiológico de *D. salina* é sua capacidade de produzir e acumular grandes quantidades de β -caroteno, especialmente sob condições de alta intensidade luminosa e de estresse salino. O β -caroteno atua como antioxidante e fotoprotetor, reduzindo os danos causados por radicais livres gerados durante a fotossíntese sob condições adversas (Borovkov *et al.*, 2021; Mawed *et al.*, 2022). Embora o β -caroteno não atue diretamente como nutriente essencial ou fitormônio em plantas cultivadas, estudos indicam que carotenoides de origem microalgal podem exercer efeitos bioestimulantes indiretos, contribuindo para a mitigação do estresse oxidativo, a melhoria da eficiência fotossintética e a ativação de mecanismos fisiológicos de tolerância a estresses abióticos, uma vez que esses compostos são precursores da biossíntese do ácido abscísico (ABA) em plantas superiores (Havaux *et al.*, 2014; Ruiz-Sola *et al.*, 2012). Dessa forma, a aplicação de biomassa ou de extratos de *D. salina* ricos em β -caroteno pode beneficiar culturas como a soja, sobretudo em condições de estresse ambiental, atuando como bioestimulante no contexto da agricultura sustentável.

Outro destaque fisiológico de *D. salina* é sua capacidade de produzir e acumular grandes quantidades de β -caroteno, especialmente sob condições de alta intensidade luminosa e de estresse salino. O β -caroteno atua como antioxidante e fotoprotetor, reduzindo os danos causados por radicais livres gerados durante a fotossíntese sob condições adversas. Estudos recentes indicam que a produção de β -caroteno pode chegar a até 10% do peso seco celular (Borovkov *et al.*,2021; Mawed.,2022).

No processo fotossintético, *D. salina* apresenta alta eficiência na conversão de energia luminosa, ajustando rapidamente sua taxa fotossintética em resposta a variações na intensidade de luz (Jo *et al.*, 2022). Suas células possuem clorofilas a e b, o que permite uma adaptação fisiológica eficiente às mudanças ambientais. Diferentemente de muitas microalgas verdes, a *D. salina* não apresenta parede celular rígida, mas apenas uma membrana plasmática espessa e flexível. Essa característica favorece alterações rápidas no volume celular em resposta a

flutuações osmóticas, além de facilitar processos industriais, como a extração de carotenoides (Barbosa *et al.*,2023).

Adicionalmente, *D. salina* apresenta movimento ativo por meio de dois flagelos, permitindo a migração em direção a condições mais favoráveis de luz e de nutrientes. A microalga também demonstra capacidade mixotrófica, podendo utilizar fontes orgânicas de carbono em determinadas situações, ampliando sua versatilidade para aplicações biotecnológicas (Jo *et al.*,2024).

Essas características fisiológicas posicionam a *D. salina* como uma microalga promissora para uso em biotecnologia, seja na produção de compostos bioativos, como β -caroteno, seja em processos sustentáveis de sequestro de CO₂ e de mitigação de impactos ambientais.

2.4 Sequestro de dióxido de carbono (CO₂)

Atualmente, um dos temas mais discutidos, devido às alterações climáticas, é a emissão abundante de dióxido de carbono, decorrente da liberação excessiva de gases de efeito estufa (GEE), dos quais 75% são dióxido de carbono (CO₂) (Haider *et al.*,2021; Yuan *et al.*,2022).

Avaliações atuais de emissão de CO₂ revelou que 91% dos desastres geofísicos são causados por mudanças climáticas (Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento) e de acordo com a *The Economist Intelligence Unit* dos Estados Unidos, estima-se que, se não forem tomadas medidas adequadas para combater esse problema, os efeitos climáticos podem custar ao mundo 7,9 trilhões de dólares e fazer com que a economia mundial perca 3% do produto interno bruto (PIB) até 2050 (Espoir *et al.*, 2021).

Segundo Miranda *et al.* (2022), há uma relação direta entre os países que apresentam elevados níveis de emissão de CO₂ e aqueles que demonstram maior produção científica voltada à temática, o que representa uma perspectiva encorajadora no desenvolvimento de alternativas para a mitigação das mudanças climáticas. Entre as soluções apontadas está a utilização de microalgas como aliadas a redução aquecimento global e o desenvolvimento de produtos com uma pegada de carbono zero, mostrando a necessidade de mais pesquisa e investimentos em diferentes áreas do conhecimento, como perspectivas biológicas, bioquímicas, engenharia, entre outras, as quais, juntamente com políticas adequadas, atrairão setores da indústria que favorecem a expansão do mercado global de tecnologias de microalgas.

Estudos mostram que as microalgas podem realizar o sequestro de dióxido de carbono durante seu desenvolvimento, o que coloca sua utilização como uma estratégia sustentável para

mitigar os impactos ambientais decorrentes do excesso desse gás na atmosfera (Prasad *et al.*, 2021). Além de serem organismos fotossintetizantes capazes de fixar CO₂ de forma eficiente, as microalgas também podem gerar produtos de alto valor agregado, como biocombustíveis, biofertilizantes, alimentos e compostos bioativos (Srimongkol *et al.*, 2022; Prasad *et al.*, 2021).

Essa capacidade de converter o dióxido de carbono em biomassa rica em nutrientes e compostos energéticos permite a reciclagem completa de nutrientes e reforça seu papel na economia circular e na bioeconomia global (Zieliński *et al.*, 2023). Dessa forma, o cultivo de microalgas se destaca como uma alternativa promissora para o sequestro biológico de carbono, contribuindo simultaneamente para a geração de bioprodutos e para a sustentabilidade ambiental.

2.5 Microalgas na Agricultura

A agricultura está entre os setores que mais contribuem para as emissões globais de gases de efeito estufa (GEE), ocupando posição de destaque quando considerados sistemas de produção convencionais e práticas de manejo intensivas (EPA, 2018). Entretanto, os impactos ambientais associados à atividade agrícola estão fortemente relacionados ao tipo de manejo adotado, podendo variar significativamente conforme as práticas utilizadas. Sistemas agrícolas pouco eficientes podem exercer pressão sobre os limites ambientais, enquanto abordagens sustentáveis apresentam potencial para mitigar emissões e contribuir para a manutenção da integridade da biosfera (Balafoutis *et al.*, 2017; Lade *et al.*, 2020).

Pesquisas envolvendo microalgas e sua aplicação na agricultura são realizadas desde a década de 1960, demonstrando que sua utilização no tratamento de plantas pode melhorar a estrutura e a fertilidade do solo, uma vez que a biomassa microalgal constitui uma fonte natural de macronutrientes, como nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre, além de micronutrientes essenciais, incluindo ferro, zinco, manganês, cobre, boro e molibdênio. Adicionalmente, as microalgas apresentam elevado teor de compostos biologicamente ativos, como aminoácidos, polissacarídeos e fitormônios, que contribuem para o crescimento vegetal e para a atividade microbiológica do solo (Alvarez *et al.*, 2021; Puglisi *et al.*, 2018; Sharma *et al.*, 2014).

No entanto, tem sido observado crescente interesse em derivados de microalgas, como fitormônios e compostos semelhantes a hormônios, incluindo auxinas, citocininas, giberelinas e ácido abscísico, além de oligossacarídeos e polissacarídeos, como sulfatados e exopolissacarídeos, e compostos fenólicos com atividade antioxidante (Gheda *et al.*, 2015; Mazhar *et al.*, 2013). Estudos conduzidos por Stadnik *et al.* (2014) demonstraram que esses

compostos apresentam elevado potencial para promover o crescimento vegetal, aumentar a absorção de nutrientes e induzir maior tolerância a estresses abióticos, como seca, salinidade e estresse oxidativo, bem como a estresses bióticos, incluindo a resistência a fitopatógenos.

Estudo realizado por Shrestha *et al.* (2022), utilizando uma abordagem integrada de pesquisa empírica e de modelagem, identificou vantagens e limitações da biotecnologia com fertilizantes de microalgas, destacando o crescimento da cultura e a eficiência no uso de nitrogênio (N), devido à maior sincronia entre a liberação de N e a absorção da cultura, como pontos positivos. Também se observou que o uso de biofertilizantes de microalgas reduziu as emissões de CO₂ e melhorou a qualidade do solo. Sendo assim, as microalgas apresentaram potencial significativo para a reciclagem e a entrega de nutrientes, aumentando a resiliência e a sustentabilidade do sistema de produção de alimentos.

Segundo González-Pérez *et al.* (2022), as microalgas têm grande potencial para aplicação na área agrícola; no entanto, muitas espécies permanecem inexploradas, o que evidencia a necessidade de pesquisas mais aprofundadas para explorar seu potencial, como bioestimuladores, nutricionais e de melhoria de solos, tanto para microalgas vivas quanto para extratos celulares aquosos e biomassa seca. Além disso, estudos Wang *et al.*, 2021 indicam que várias espécies de microalgas podem tornar os sistemas de produção mais economicamente viáveis.

De Moraes *et al.* (2023) concluíram que a utilização de biofertilizantes derivados de microalgas pode contribuir para o equilíbrio dos níveis de nutrientes no solo, especialmente no fornecimento complementar de macronutrientes e micronutrientes. Embora esses bioinsumos não supram integralmente as exigências nutricionais das culturas, particularmente em relação aos macronutrientes primários, sua aplicação favorece o cultivo saudável das plantas, podendo contribuir significativamente para a agricultura sustentável e para a mitigação de CO₂. Adicionalmente, a integração de sistemas de tratamento de águas residuais por microalgas representa uma solução promissora no contexto da economia circular, ao permitir a produção de biofertilizantes e a valorização de recursos no setor hídrico, promovendo uma agricultura mais sustentável e ambientalmente responsável.

Muitas microalgas destacam-se por produzir metabólitos bioativos, incluindo fitormônios e compostos análogos, capazes de regular processos fisiológicos vitais nas plantas, como divisão celular, crescimento, desenvolvimento radicular e resposta a estresses abióticos e bióticos (Sánchez-Quintero *et al.*, 2023). Entre os principais fitormônios identificados em microalgas estão as auxinas, especialmente o ácido indol-3-acético (AIA), associadas ao alongamento celular e à formação de raízes; as citocininas, como a zeatina, responsáveis pela

divisão celular e pelo retardo da senescência; as giberelinas, envolvidas na germinação de sementes e no alongamento do caule; e o ácido abscísico, que atua como mediador central nas respostas a estresses ambientais (Parmar *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2021). Espécies como *Chlorella vulgaris*, *Arthrospira platensis*, *Spirulina* spp. e *Dunaliella salina* são amplamente reconhecidas por sua capacidade de sintetizar e secretar essas classes hormonais, contribuindo para o efeito bioestimulante observado na aplicação agrícola de biomassa e extratos microalgais.

2.6 Nanotecnologia, nanopartículas na área agrícola

A nanotecnologia pode ser uma das chaves para contornar esses problemas relacionados à produção de alimentos e às alterações climáticas, possibilitando a resistência de plantas a estresses bióticos (patógenos em geral) e abióticos (deficiência hídrica, alterações de temperatura etc.). A utilização de soluções nanotecnológicas também possibilita a otimização do uso de nutrientes e a preservação pós-colheita das culturas (Cao *et al.*, 2024; Daniel *et al.*, 2024; Manzoor *et al.*, 2022).

As nanopartículas (NPs) apresentam propriedades físico-químicas diferenciadas, como a reatividade aumentada, alta relação superfície-volume, alta especificidade e capacidade de liberação diferenciada (Cao *et al.*, 2024). O desenvolvimento de nanomateriais funcionais que apresentam custo-efetividade, biocompatibilidade e biodegradabilidade na forma de nanoaditivos, nanofertilizantes, nanosensores, nanopesticidas, nanoherbicidas, dentre outros, tem atraído uma considerável atenção no campo da agricultura, por permitir a entrega eficiente e direcionada de defensores agrícolas e nutrientes, aumentando a resistência das plantas a diversos fatores de estresse, além de atuar como nanosensores para a detecção de diversos poluentes, doenças e nutrição vegetal insuficiente (Manzoor *et al.*, 2022).

Entre os diferentes nanomateriais, as nanopartículas de origem biogênica são consideradas ecologicamente mais sustentáveis, uma vez que apresentam menor geração de resíduos tóxicos e maior viabilidade econômica, devido ao seu custo relativamente baixo (Seabra *et al.*, 2013). Além disso, esses nanomateriais oferecem vantagens significativas por dispensarem o uso de agentes químicos e físicos agressivos, frequentemente empregados em rotas convencionais de síntese, bem como por não exigirem elevadas quantidades de energia, o que reduz o impacto ambiental do processo produtivo (Singh *et al.*, 2016).

A síntese biogênica pode ser mediada por uma infinidade de microrganismos, como bactérias, fungos, microalgas, leveduras e plantas. Os componentes biológicos, como as enzimas, podem atuar como agentes redutores. Os principais componentes identificados são os

exopolissacarídeos, peptídeos, nitrato redutase de micro-organismos, celulose, quitina, dextrana, alginatos de plantas (Guilger-Casagrande; de Lima 2021). Em comparação aos métodos físicos e químicos, o método biogênico pode ser realizado em temperatura e pressão ambiente, além de evitar o uso de aditivos tóxicos (Bilesky-José *et al.*,2021; Manimaran *et al.*,2016).

2.7 Síntese biogênicas de nanopartículas metálicas (Ag, Zn e Ti) utilizando microalgas

A utilização de nanopartículas metálicas de síntese biogênica, obtidas a partir de microalgas, para aplicação na área agrícola apresenta resultados promissores, sendo uma possível alternativa sustentável aos fertilizantes tradicionais, aumentando a fertilidade do solo, a retenção de água e promovendo o crescimento das plantas e a atividade microbiana, o que é crucial para práticas agrícolas sustentáveis (Elalami *et al.*,2021; Gonçalves *et al.*,2023).

A síntese biogênica de nanopartículas de prata (AgNPs) é uma abordagem promissora para aplicações agrícolas, pois as microalgas produzem diversos compostos bioativos, como proteínas, polissacarídeos, pigmentos e fenóis. Esses compostos atuam simultaneamente como agentes redutores e estabilizantes na formação das AgNPs, especialmente no controle de patógenos, demonstrando ser biocompatível, com baixa toxicidade e atividade antibacteriana (Guilger-Casagrande *et al.*, 2022; Do *et al.*, 2025), dispensando a utilização de reagentes tóxicos, permitindo a produção de nanopartículas com propriedades físico-químicas controláveis, como tamanho, forma e estabilidade coloidal (Terra *et al.*,2019). Diversas espécies de microalgas a exemplo de *Chlorella vulgaris*, *Scenedesmus obliquus*, *Dunaliella salina*, *Spirulina platensis* e *Arthrospira spp.*, já demonstraram capacidade de sintetizar AgNPs, com variações nos resultados conforme o tipo de biomassa utilizada (líquida ou liofilizada), as condições de cultivo e os parâmetros da reação de síntese (Do *et al.*,2025; Mora-Godínez *et al.*,2023).

Nanopartículas de zinco (ZnNPs) associadas a microalgas marinhas têm demonstrado elevado potencial para aplicação em diversos campos da biotecnologia. Essas nanopartículas favorecem o crescimento das microalgas e atuam como agentes de controle de doenças de plantas, destacando-se por sua segurança ambiental em comparação aos agroquímicos convencionais. Estudos relatam atividade antifúngica e antibacteriana contra importantes fitopatógenos, como *Fusarium oxysporum*, *Alternaria alternata*, *Botrytis cinerea*, *Rhizoctonia solani*, além de bactérias fitopatogênicas dos gêneros *Xanthomonas*, *Pseudomonas syringae* e *Ralstonia solanacearum* (Al Jabri *et al.*, 2022; Tran *et al.*, 2023; Salmeron *et al.*, 2025). Os

principais benefícios observados incluem o melhor crescimento das plantas, maior eficiência no uso de nutrientes e efeitos antimicrobianos, o que torna as ZnNPs promissoras para o desenvolvimento de estratégias voltadas à agricultura sustentável.

A síntese de nanopartículas de titânio (TiNPs) por meio de metabólitos extracelulares de microalgas envolveu a incorporação de compostos bioativos na formação e estabilização dessas nanopartículas (Fayyad *et al.*, 2024). Esta rota biogênica permite a produção econômica e atóxica de TiNPs com atividades biotecnológicas promissoras, incluindo efeitos antimicrobianos e anticancerígenos. Embora a aplicação de microalgas na síntese de TiNPs ainda esteja em expansão, estudos preliminares indicam que essas nanopartículas apresentam morfologia controlada, boa dispersão coloidal e elevada estabilidade, tornando-se promissoras para uso em áreas ambientais, biomédicas e agrícolas (Mutaf *et al.*, 2023).

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste projeto é realizar a síntese de nanopartículas biogênicas a partir da microalga *D. salina*, com a intenção de utilizá-las para melhorar a produção de biomassa e de moléculas de interesse agrícola e impulsionar o sequestro de CO₂ atmosférico ao longo do projeto.

3.2 Objetivos Específicos

- Síntese de nanopartículas de prata, zinco e titânio utilizando a microalga *D. salina*;
- Caracterização das nanopartículas de microalga utilizando técnicas de DLS e mobilidade eletroforética utilizando o equipamento ZetaSizer Nano ZS 90 e rastreamento de nanopartículas (NTA) e análise de espectroscopia infravermelha transformada de Fourier (FTIR);
- Avaliar a morfologia e composição química das microalgas por microscopia eletrônica de varredura e analisar o pH;
- Determinar a curva de crescimento da microalga *D. salina*;
- Determinação do sequestro de CO₂ em diferentes condições de cultura e presença de nanopartículas;
- Avaliar a biomassa produzida quanto às características bioquímicas e capacidade biofertilizante;
- Avaliar a germinação de sementes *in vitro* e em solo com nanopartículas de microalgas;
- Avaliar a capacidade biofertilizante das nanopartículas de microalgas em plantas;

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Material

A microalga verde *D. salina* foi obtida do Banco de Microrganismos Aidar & Kutner (BMAK) do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo.

4.1.1 Meio de cultura

O meio de cultivo utilizado para o crescimento da microalga foi o meio Guillard f/2, uma formulação amplamente reconhecida e empregada no cultivo de microalgas marinhas costeiras, especialmente diatomáceas (Guillard & Ryther, 1962; Guillard, 1975). Onde as soluções foram fornecidas pelo Banco de Microrganismos Aidar & Kutner (BMAK). A concentração aplicada foi uma diluição da formulação original, denominada "f Medium" (Guillard & Ryther, 1962), ajustada para atender às necessidades específicas das microalgas cultivadas.

A preparação do meio envolveu o enriquecimento da água marinha comercial, com salinidade de 30 e 37 PSU (Escala Prática de Salinidade), com nutrientes inorgânicos essenciais, incluindo nitratos, fosfatos e um coquetel de vitaminas, para otimizar o crescimento celular. Para isso, foram adicionadas alíquotas das soluções de estoque previamente preparadas, garantindo a disponibilidade adequada de macronutrientes e micronutrientes ao longo do cultivo. Essa abordagem visa maximizar a produção de metabólitos extracelulares pela microalga, os quais são fundamentais para a síntese subsequente das nanopartículas.

4.2 Método

4.2.1 Sequestro de CO₂ por microalga

A capacidade de microalgas de sequestrar CO₂ atmosférico está diretamente relacionada à sua produção de biomassa, uma vez que aproximadamente 50% da biomassa seca corresponde ao teor de carbono celular Chisti (2007). Esse carbono é proveniente do CO₂ fixado durante a fotossíntese e é posteriormente convertido em matéria orgânica.

A estimativa do CO₂ fixado foi realizada com base na biomassa seca, considerando que 50% do peso seco da microalga corresponde a carbono Chisti (2007). A conversão para CO₂ foi realizada com base na proporção estequiométrica entre os pesos moleculares de carbono (12

g/mol) e de CO₂ (44 g/mol), conforme apresentado por Lee *et al.* (2001). A fórmula utilizada será:

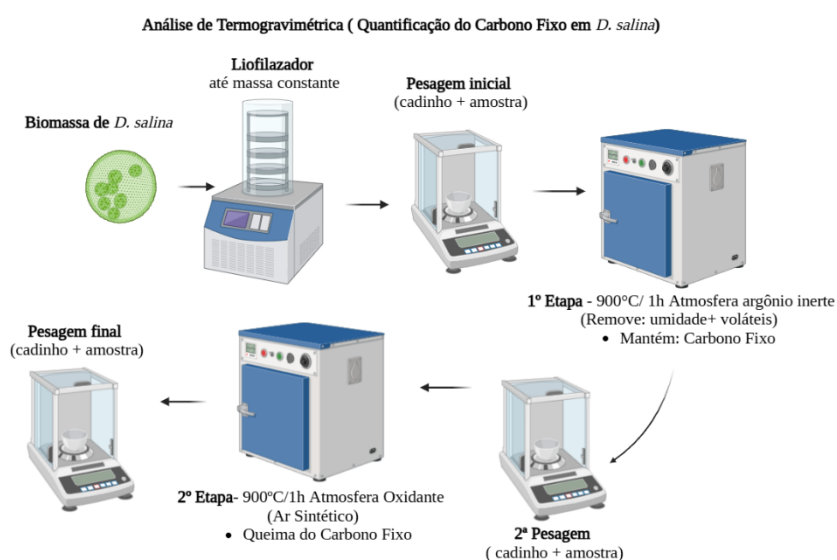
$$\text{CO}_2 \text{ fixado (g)} = \text{Biomassa seca (g)} \times 0,5 \times 3,67$$

O experimento foi conduzido com base na metodologia proposta por Chisti (2007), utilizando duas amostras de 200 mL de cultura de *D. salina*. A primeira foi mantida sob condições ideais de cultivo, enquanto a segunda foi exposta às mesmas condições, com adição controlada de CO₂ a 5%. Ambas as amostras permaneceram em cultivo por 168 horas. Ao final desse período, realizou-se a centrifugação para separação da biomassa, seguida da secagem em estufa para obtenção da biomassa seca. Posteriormente, as amostras foram pesadas e os dados obtidos foram comparados para avaliar a influência do CO₂ adicional na produção de biomassa.

4.2.2 Análise Termogravimétrica para Determinação de Carbono Fixo em *D. salina*

A análise termogravimétrica foi realizada com o objetivo de quantificar o carbono fixo na biomassa da microalga *D. salina*, como indicador indireto da capacidade de fixação de CO₂ durante o cultivo. Inicialmente, a biomassa foi liofilizada até massa constante na Figura 1 pode-se observar o esquema utilizado. Uma alíquota de 1,6000 g de biomassa seca foi acondicionada em um cadinho previamente seco e pesado. A massa inicial do cadinho vazio foi de 30,0956 g, enquanto a massa do conjunto cadinho + amostra foi de 31,6886 g.

Figura 1 – Análise termogravimétrica de quantificação de carbono fixo na biomassa.



Fonte: Elaboração própria.

A amostra foi submetida a tratamento térmico em forno tipo mufla a 900 °C por 1 hora, sob atmosfera inerte de argônio (Ar), com o objetivo de remover compostos voláteis e

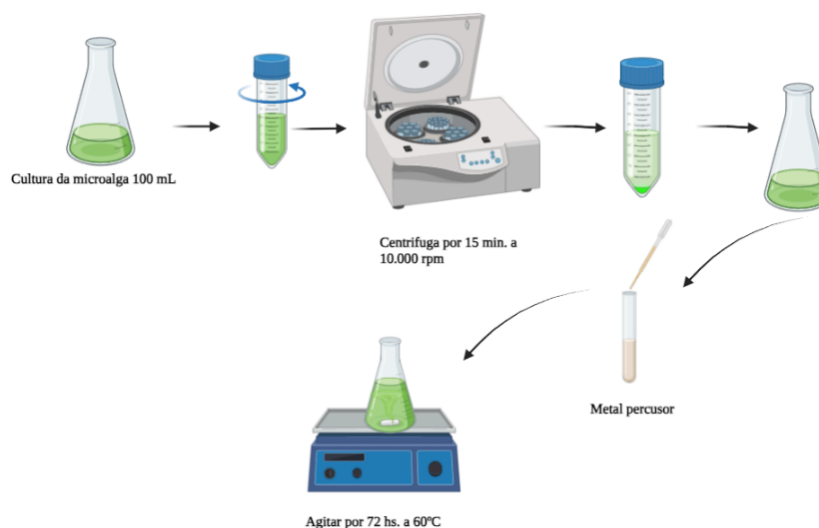
matéria orgânica termo degradável, sem promover oxidação completa. Após resfriamento em dessecador, o conjunto foi novamente pesado, obtendo-se massa da amostra de 1,2190 g, mantendo-se inalterada a massa do cadinho.

Na etapa subsequente, o material foi submetido novamente a 900 °C por 1 hora, desta vez sob atmosfera oxidante (ar atmosférico), promovendo a combustão do carbono fixo remanescente. Após novo resfriamento no dessecador, a massa final da amostra foi de 1,1556 g, permanecendo constante a massa do cadinho. A partir das variações de massa, foram calculadas as frações percentuais de voláteis + umidade, de carbono fixo e de cinzas.

4.2.3 Síntese das nanopartículas

Para cada síntese de nanopartículas a partir de *D. salina*, as culturas foram centrifugadas a 10.000 rpm por 15 min. O sobrenadante foi descartado e em seguida, adicionada água ultrapura para que a concentração celular fosse ajustada a 1×10^8 células/mL. Na solução de microalga, foram adicionados os precursores metálicos de nitrato de prata (AgNO_3) e de acetato de zinco dihidratado ($\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_4\text{Zn} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), e o isopropóxido de titânio ($\text{C}_{12}\text{H}_{28}\text{O}_4\text{Ti}$), sintetizados utilizando o microrganismo *D. salina* como agente estabilizador. Todas as soluções foram ajustadas a 1 mM, conforme Figura 1. Seguindo o protocolo com adaptações (Mora-Godínez *et al.*, 2022; Sidorowicz *et al.*, 2023). Na Figura 2 pode-se observar o esquema utilizado na síntese de nanopartículas.

Figura 2 - Esquema proposto para a síntese das nanopartículas obtidas neste estudo.



Fonte: Elaboração própria.

4.2.4 Caracterização físico-química das nanopartículas

A caracterização de todas as nanopartículas foi realizada por meio da análise dos parâmetros tamanho, índice de polidispersão (PDI) e potencial zeta (ZetaSizer Nano ZS 90 *Malvern Instruments*). As análises de diâmetro e PDI foram realizadas pela técnica de espalhamento dinâmico de luz (DLS) e pelo potencial zeta, que indica a carga de superfície, por meio da mobilidade eletroforética. As amostras foram diluídas com água ultrapura e realizadas três leituras por amostra, a um ângulo fixo de 90° e a 25 °C.

A análise de tamanho, concentração e polidispersão das nanopartículas foi realizada pela técnica de rastreamento de nanopartículas (NTA), no equipamento NanoSight PRO, com câmera acoplada ao software NS Xplorer 1.2.0.3. A medição do pH foi realizada por meio de um potenciômetro calibrado com soluções tampão de pH 7,0 e 4,0.

Para análise por espectroscopia infravermelha transformada de Fourier (FTIR), os espectros foram obtidos à temperatura ambiente em um espectrômetro *Agilent Cary 630*, que permite a determinação de funções químicas presentes em amostras puras ou em misturas, bem como a análise qualitativa e quantitativa dos modos vibracionais de compostos inorgânicos e orgânicos na região do infravermelho. O Cary 630 permite a coleta de espectros por refletância total atenuada (ATR) na faixa de comprimento de onda de 4000 a 650 cm^{-1} . A obtenção de espectros de absorção da radiação eletromagnética nas regiões visível e ultravioleta, na faixa espectral de 200 a 1100 nm.

4.2.5 Determinação do Crescimento da microalga

Para avaliar o crescimento por densidade óptica (DO), a microalga foi inicialmente cultivada em meio líquido Guillard f/2 por 168 horas, a 27 °C, em regime claro/escuro de 16/8 h, sob agitação orbital a 180 rpm. Após 78 horas de agitação, foi realizada a leitura da absorbância a 600 nm (OD600) para determinação da densidade inicial. Em seguida, as culturas foram distribuídas em placas de cultivo com 24 poços, cada um com 1,5 mL de cultura.

Os tratamentos foram montados em sextuplicata, com três repetições experimentais independentes. Para cada nanopartícula (AgNPs, ZnNPs e TiNPs), foram testadas as concentrações finais de 5%, 2%, 1% e 0,5% (0,135; 0,054; 0,041 e 0,013 $\times 10^9$ NPs mL^{-1}). Como controle, foram preparadas culturas contendo *D. salina* e água, na mesma proporção empregada para cada concentração de nanopartículas, permitindo avaliar o efeito da diluição e acompanhar o comportamento natural da microalga ao longo do tempo. As leituras foram

realizadas a cada 24 h, durante 168 horas, seguindo o protocolo de Gitau *et al.* (2021), com adaptações.

4.2.6 Avaliação de germinação e crescimento sementes de feijoeiro (*Phaseolus vulgaris*) e tomateiro (*Solanum lycopersicum*) em exposição às nanopartículas

Para avaliação da germinação e do crescimento *in vitro*, em sementes de feijão carioca (*Phaseolus vulgaris*) e de tomate-cereja (*Solanum lycopersicum*), foram pesados 100 g de sementes de feijão e 1 g de sementes de tomate, respectivamente descontaminadas com hipoclorito de sódio a 1% e com álcool a 70%. As sementes foram colocadas em sacos plásticos com 2 mL de nanopartículas nas concentrações de 1%; 1,5%; 2%; 2,5%; 3,5% e 5% (0,027; 0,041; 0,054; 0,068; 0,095 e $0,135 \times 10^9$ NPs mL⁻¹). Como controle, foram utilizadas amostras de água ultrapura e de *D. salina*.

Em seguida, os sacos foram agitados vigorosamente por 30 segundos, visando uma uniformização dos tratamentos, e deixados para secar por 12 h. Após a secagem, as sementes foram colocadas para germinar em papel germinativo durante 168 horas a 25 °C. Durante esse período de crescimento, a parte aérea e a raiz das plântulas foram fotografadas e medidas no software ImageJ.

Paralelamente, as sementes foram plantadas em tubetes, as sementes foram tratadas conforme descrito anteriormente e semeadas em solo livre de qualquer contaminação, nas concentrações de 1,5%, 2,5%, 3,5% ($0,041; 0,068; 0,095 \times 10^9$ NPs mL⁻¹), sendo plantadas 2 sementes por tubete para feijão e 3 sementes por tubete para tomate, totalizando 5 tubetes por tratamento, para cada experimento.

Após um período de 20 dias, as plantas foram removidas do substrato e avaliados o desenvolvimento do comprimento de raízes, parte aérea, massa seca de raízes e foliar.

4.2.7 Análise Estatística dos Resultados

As análises estatísticas dos resultados dos ensaios foram realizadas por meio de ANOVA, seguidas do teste *post hoc* de Tukey's HSD (variâncias iguais), no programa *GraphPad Prism*. A significância estatística foi definida como $p < 0,05$.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Sequestro de CO₂ *D. salina*

Considerando a estequiometria molecular, adota-se a razão de conversão de 1 g de C para 3,67 g de CO₂, o que permite estimar, de forma indireta e eficiente, o sequestro de carbono. O sequestro de CO₂ por meio da biomassa de microalgas é uma estratégia promissora para mitigar as emissões de carbono, aproveitando a alta capacidade fotossintética dessas microalgas para fixar o CO₂ e convertê-lo em biomassa de valor agregado (Ashour *et al.*, 2024; Chen *et al.*, 2023; Krishnamoorthy *et al.*, 2024).

Os resultados obtidos demonstraram que a produção de 0,95 g de biomassa seca de *D. salina* em condições ideais de cultivo sem exposição de CO₂ resultou no sequestro estimado de 1,75 g de CO₂, enquanto a amostra sob as mesmas condições, mas com exposição direta de CO₂ a 5%, apresentou um aumento na produção de biomassa seca, alcançando 1,25 g, o que corresponde a 2,28 g de CO₂ fixado (Tabela 1). Esses dados corroboram pesquisas e favorecem o crescimento de *D. salina*, promovendo maior incorporação de carbono na biomassa.

Estudos envolvendo espécies como *Chlorella vulgaris* e *D. salina* demonstraram alta eficiência fotossintética e capacidade de acumular carbono sob condições otimizadas de cultivo (Ashour *et al.*, 2024; Chen *et al.*, 2023; Krishnamoorthy *et al.*, 2024; Yahaya *et al.*, 2025.). Esses resultados reforçam o potencial de *D. salina* como um sistema biotecnológico sustentável para sequestro biológico de carbono, unindo alta produtividade de biomassa à possibilidade de utilização industrial em bioprodutos de interesse agrícola e energético.

Tabela 1 - Sequestro de CO₂ por meio da adição controlada de 5% de CO₂ durante 7 dias.

Amostra	Biomassa Seca (g)	Carbono Estimado (g)	CO ₂ sequestrado (g)
BOD CO ₂ ausente	0,95	0,48	1,75
Estufa Com CO ₂ Em 5%	1,25	0,62	2,28

5.1.2 Análise Termogravimétrica para Determinação de Carbono Fixo em *D. salina*

A análise termogravimétrica da biomassa de *Dunaliella salina* revelou teor de carbono fixo de 3,98%, além de 23,48% de voláteis + umidade e 72,54% de cinzas.

O carbono fixo corresponde à fração carbonácea termicamente estável remanescente após a etapa de pirólise sob atmosfera inerte e subsequente oxidação, sendo um indicativo da presença de estruturas orgânicas derivadas da assimilação de carbono inorgânico durante o crescimento da microalga, conforme apresentado na (Tabela 2).

Tabela 2 - Composição termogravimétrica da biomassa de *D. salina*.

Parâmetro	Percentual (%)
Voláteis + Umidade	23,483
Carbono fixo	3,98
Cinzas	72,54

A fixação de CO₂ por microalgas ocorre principalmente pelo ciclo de Calvin-Benson, no qual a enzima RuBisCO catalisa a incorporação de CO₂ em compostos orgânicos. Revisões recentes destacam que microalgas apresentam elevada eficiência na conversão de CO₂ em biomassa, podendo atingir altas taxas de biofixação quando cultivadas sob condições controladas de luz, nutrientes e suplementação gasosa (Kumar *et al.*, 2020). De forma complementar, Zhu *et al.* (2023) enfatizam que o cultivo de microalgas representa uma estratégia promissora para sequestro de carbono, especialmente quando integrado a sistemas de tratamento de efluentes e correntes industriais ricas em CO₂.

O teor de carbono total na biomassa de microalgas é frequentemente relatado entre 45–55% da massa seca, dependendo das condições de cultivo e da disponibilidade de carbono inorgânico (Zhang *et al.*, 2018). Embora o valor de 3,98% obtido neste trabalho represente apenas a fração de carbono fixo residual após tratamento térmico e não o carbono total da biomassa, ele confirma a presença de carbono estrutural estável derivado da assimilação fotossintética de CO₂.

Estudos mais recentes também demonstram que o uso de gases de exaustão industrial como fonte de carbono pode aumentar a eficiência da biofixação microalgal, mantendo o crescimento celular e a incorporação significativa de carbono estrutural (Padhi *et al.*, 2025).

Além disso, estratégias de otimização metabólica e de engenharia de cultivo têm sido propostas para intensificar a fixação de CO₂ em diferentes espécies de microalgas (Cheng *et al.*, 2019). A elevada fração de cinzas observada (72,54%) pode estar associada às características halofílicas de *Dunaliella salina* cultivada em meios de alta salinidade. A literatura recente aponta que condições salinas elevadas podem influenciar significativamente a composição elementar da biomassa e aumentar o teor residual inorgânico após calcinação (Zhang *et al.*, 2018; Zhu *et al.*, 2023).

Do ponto de vista ambiental, a integração de cultivos de microalgas a fontes estacionárias de emissão tem sido amplamente discutida como estratégia sustentável de mitigação de CO₂, possibilitando a conversão do carbono atmosférico em biomassa com potencial de aplicação industrial (Kumar *et al.*, 2020; Zhu *et al.*, 2023; Padhi *et al.*, 2025). Assim, embora a termogravimetria não permita quantificar o carbono total assimilado, os dados

obtidos fornecem evidência indireta da incorporação de carbono inorgânico na biomassa de *Dunaliella salina*, sustentando seu potencial como agente biotecnológico para o sequestro biológico de CO₂.

5.2 Síntese e Caracterização das nanopartículas das microalgas *Dunaliella salina*

5.2.1 Tamanho, polidispersão e potencial zeta

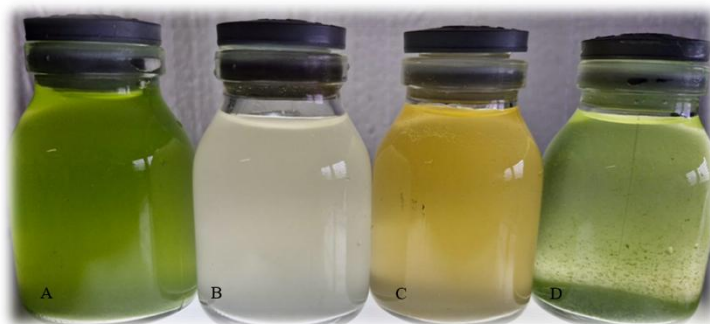
As nanopartículas mediadas por *D. salinam* foram sintetizadas a partir do pellet do microrganismo, conforme o método descrito, utilizando reagentes químicos como fontes de íons metálicos. Os metabólitos produzidos durante o cultivo das microalgas atuaram como agentes redutores e estabilizantes biológicos no processo de formação das nanopartículas, caracterizando uma rota de síntese biogênica. Os resultados obtidos estão apresentados na (Tabela 3).

Tabela 3 - Caracterização físico-química das nanopartículas biogênicas.

NPs	DLS			NTA		pH
	Diâmetro hidrodinâmico (nm)	Índice de Polidispersão	Potencial zeta (mV)	Tamanho (nm)	Concentração (NP/mL)	
AgNPs	84,12 ± 1,05	0,23 ± 0,02	-4,78 ± 4,05	146	2,70 x 10 ⁹	7,44
ZnNPs	84,81 ± 23,10	0,91 ± 0,14	-2,44 ± 0,61	207	2,70 x 10 ⁹	7,25
TiNPs	165 ± 1,91	0,53 ± 0,08	-6,00 ± 4,89	215	2,70 x 10 ⁹	7,17

Aqui ressalta-se que as análises de NTA foram realizadas 1 mês antes das de DLS, sugerindo que as nanopartículas se estabilizaram em tamanho menor do que o observado após a síntese (Kim *et al.*, 2019; Monakhova *et al.*, 2023). Após a síntese das nanopartículas, foi possível observar uma alteração visível a olho nu, considerada um indicativo de síntese, com características distintas conforme a síntese realizada (Asif *et al.*, 2022) (Figura 3).

Figura 3- Fases de transformação da cultura de *D. salina* em conjunto com as NPs **A:** Cultura de microalga **B:** Nanopartículas de isopropóxido de titânio (C₁₂H₂₈O₄Ti) na concentração de 1 mM (TiNPs); **C:** Nanopartículas de nitrato de prata (AgNO₃), na concentração de 1 mM (AgNPs); e **D:** Nanopartículas de acetato de zinco diidratado (C₄H₆O₄Zn·2H₂O), na concentração de 1 mM (ZnNPs).



Fonte: Elaboração própria.

A síntese biogênica de nanopartículas de prata (AgNPs) utilizando o *pellet* da microalga *D. salina* como agente redutor e estabilizante, mostrou que após a exposição a solução de AgNO₃ foi iniciada a biossíntese com a reação de mudança de cor, na qual a solução translúcida de AgNO₃ quando em contato com o filtrado da microalga passa a apresentar coloração amarelo claro, sugerindo o aparecimento de nanopartículas de prata como mostra na (Figura 2C) (Shantkriti *et al.*, 2023; Teh *et al.*, 2022).

Os resultados mostraram que AgNPs apresentaram características coloidais consistentes com nanopartículas estáveis e bem dispersas (Tabela 3), conforme indicado pelo baixo índice de polidispersão, sugerindo uma distribuição de tamanho relativamente homogênea. O diâmetro hidrodinâmico médio está dentro da faixa típica para nanopartículas metálicas sintetizadas biologicamente (Mora-Godínez *et al.*, 2022; Shantkriti *et al.*, 2023).

O potencial zeta negativo contribui para a estabilidade coloidal da nanopartícula, a negatividade das superfícies AgNPs pode ser atribuída à adsorção de biomoléculas presentes em extratos de *D. salina* em superfícies, que podem desempenhar papel na atividade física, química e biológica das AgNPs, embora valores por volta e superiores à ± 30 mV sejam considerados ideais para uma estabilidade elevada, a caracterização está no padrão de valores encontrados na literatura, sobre as AgNPs (Gonzalez *et al.*, 2022; Hamida *et al.*, 2022; Teh *et al.*, 2022), considerando ser uma nanopartícula biogênica devemos lembrar que o *capping* também é responsável pela sua estabilidade.

A síntese com acetato de zinco di-hidratado apresentou um tempo de reação menor. O índice de polidispersão foi maior do que o das demais nanopartículas, indicando maior heterogeneidade de tamanho. Embora haja maior heterogeneidade, as ZnNPs são sintetizadas a partir de um precursor mais sustentável. A síntese é indicada por mudança na cor da mistura, em que, ao contato da solução de acetato de zinco dihidratado (C₄H₆O₄Zn·2H₂O) com o filtrado da microalga, observa-se alteração de coloração para verde-claro, sugerindo o aparecimento de nanopartículas de zinco, como mostra a Figura 3D (Hameed *et al.*, 2023; Mishra *et al.*, 2025).

Em relação ao potencial zeta negativo, sugere-se estabilidade coloidal moderada. Estudos mostram que algumas nanopartículas estáveis apresentaram potencial zeta acima de -21 mV para nanopartículas derivadas de acetato de zinco dihidratado, sugerindo um encapsulamento efetivo por biomoléculas das microalgas, que aumentam a repulsão eletrostática e previnem a agregação. (Gatou *et al.*, 2022; Guardiola-Márquez *et al.*, 2023; Mawed *et al.*, 2022).

As TiNPs apresentaram diâmetro hidrodinâmico maior do que as AgNPs e as ZnNPs, sugerindo a presença de uma camada mais espessa de compostos orgânicos derivados da

biomassa de *D. salina*, que atuam como agentes redutores e estabilizantes. O índice de polidispersão indica uma distribuição de tamanho moderadamente heterogênea, característica comum em sínteses biogênicas. A alteração da coloração esbranquiçada observada indica que, quando em contato com o filtrado da microalga, a síntese foi iniciada, o que é um indicativo de síntese (Figura 3B).

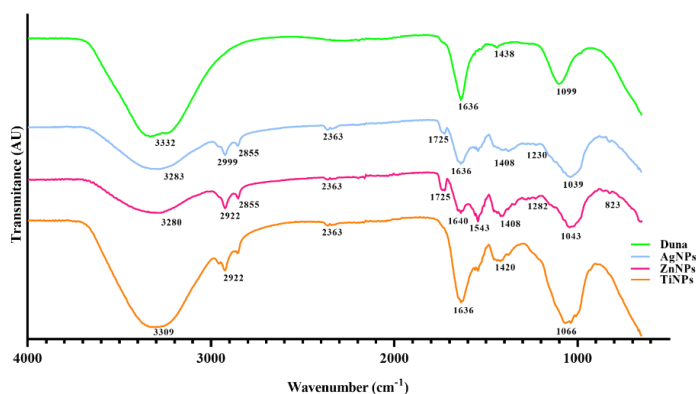
O potencial zeta sugere estabilidade coloidal moderada, embora estas características não sejam determinantes para a atividade. Estudos mostram que nanopartículas de zinco têm se apresentado promissoras para uso como fertilizantes nanoestruturados, remediação ambiental e sistemas de liberação controlada de nutrientes, com potencial multifuncional em contextos agrícolas e ecológicos (Batool *et al.*, 2024; Fayyad *et al.*, 2024; Hu *et al.*, 2018; Matouke *et al.*, 2018).

5.2.2 Análise de FTIR

Os espectros de FTIR das nanopartículas biogênicas de AgNPs, ZnNPs e TiNPs, bem como do filtrado de *D. salina* utilizado na síntese, foram analisados para identificar os grupos funcionais associados às nanopartículas após a síntese (Figura 3). Essa análise permitiu obter um indício de quais compostos são responsáveis por estabilizá-las.

De modo geral, os espectros de FTIR (Figura 4) apresentaram biomoléculas específicas de microalgas que participam da redução de íons metálicos das nanopartículas e, posteriormente, estabilizam essas nanopartículas por meio do revestimento de suas superfícies. Entre os principais grupos funcionais identificados destacam-se hidroxilas (O–H), aminas (N–H), carbonilas (C=O), fosfatos (P=O) e grupos amida de proteínas, além de lipídios e polissacarídeos (Mora-Godínez *et al.*, 2023; Sidorowicz *et al.*, 2023; Taherzadeh *et al.*, 2021).

Figura 4 - Espectro infravermelho obtido para as nanopartículas biogênicas: nanopartículas de nitrato de prata (AgNO_3) (AgNPs), nanopartículas de acetato de zinco diidratado ($\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_4\text{Zn} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) (ZnNPs), nanopartículas de isopropóxido de titânio ($\text{C}_{12}\text{H}_{28}\text{O}_4\text{Ti}$) (TiNPs) e o filtrado a partir de *Dunaliella salina* utilizado para a síntese das nanopartículas.



Fonte: Elaboração própria.

Esses compostos orgânicos, como polissacarídeos, peptídeos e pigmentos, são reconhecidos por atuar na formação de complexos biomoleculares e na biomineração de metais, ajustando-se à superfície metálica por meio de grupos funcionais C = O, NH₂ e SH, o que favorece a biossíntese e a estabilização das nanopartículas.

Nos espectros de AgNPs, ZnNPs, TiNPs e *D. salina*, observou-se uma ampla banda de absorção entre 3200 e 3400 cm⁻¹, atribuída ao estiramento de grupos de hidroxila (OH) e amina (N-H). Essas bandas indicam a presença de compostos fenólicos e proteicos envolvidos nos processos de redução e estabilização das nanopartículas, o que confirma a interação direta das biomoléculas de *D. salina* com os metais durante a formação das NPs (Mora-Godínez *et al.*, 2023; Sidorowicz *et al.*, 2023; Taherzadeh *et al.*, 2021). As bandas localizadas entre 2999 e 2855 cm⁻¹ correspondem ao estiramento C–H de grupos metileno, refletindo a presença de metabólitos lipídicos e hidrocarbonetos derivados das microalgas, os quais contribuem para a estrutura e o recobrimento das nanopartículas (Do *et al.*, 2025; Taherzadeh *et al.*, 2021).

As bandas em 1640 e 1540 cm⁻¹ são atribuídas ao estiramento da ligação C=O do grupo carbonila e confirmam que proteínas e fosfato contribuíram para a redução e a estabilização. De acordo com a literatura, é indicado que os grupos amida de lipídios de proteínas são fundamentais para a síntese biogênica de AgNPs com microalgas (Do *et al.*, 2025; Mora-Godínez *et al.*, 2023; Sidorowicz *et al.*, 2023; Taherzadeh *et al.*, 2021).

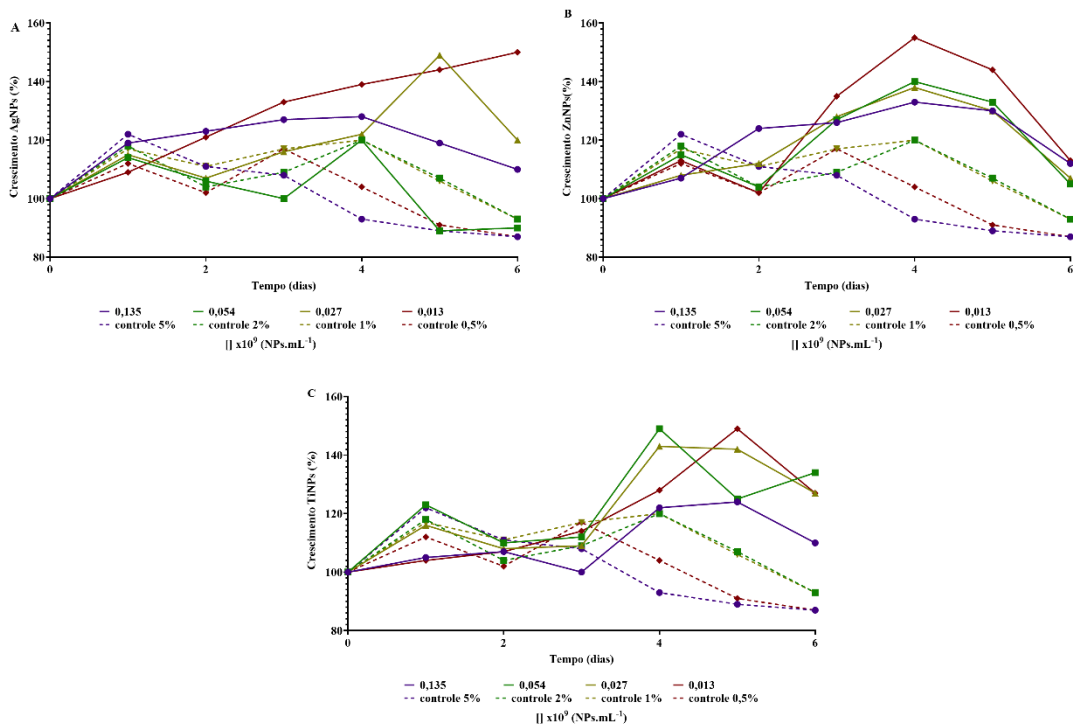
Outras bandas relevantes incluem as de 1438 e 1099 cm⁻¹, que correspondem ao estiramento da ligação C–O, atribuídas ao grupo carboxílico, álcool, éster ou éter, P=O de fosfato, além de um pico em 823 cm⁻¹ que pode estar associado à flexão fora do plano de C–H, sugerindo a presença de biomoléculas específicas da microalga no capeamento das ZnNPs (Hameed *et al.*, 2023). As TiNPs apresentaram bandas em 3309, 2922 e 1636 cm⁻¹, relacionadas ao estiramento O–H, N–H e C–H, e à amida, respectivamente, e um pico bem definido em 1066 cm⁻¹, atribuível ao estiramento C–O de polissacarídeos, reforçando o papel dessas biomoléculas na formação e estabilização das nanopartículas de titânio. Conforme estudos que apontam a ação conjunta de proteínas, lipídios, fosfatos e polissacarídeos como elementos-chave na síntese e estabilidade de nanopartículas metálicas biosintetizadas por microalgas (Do *et al.*, 2025; Sidorowicz *et al.*, 2023; Taherzadeh *et al.*, 2021).

5.3 Determinação do Crescimento das microalgas a partir das nanopartículas

O crescimento das microalgas em presença de NPs foi avaliado pelo método descrito por Gitau *et al.* (2021), aplicando diferentes concentrações (5, 2, 1 e 0,5%) para cada tipo de nanopartícula testada e realizando a leitura da placa ao longo de 168 horas.

A DO das culturas foi medida pela absorbância a 600 nm como indicador indireto de crescimento celular (Figura 5). Este procedimento permite avaliar o efeito das nanopartículas sobre a biomassa da microalga, com base na metodologia padronizada para o cultivo e a análise do crescimento (Su *et al.*, 2020). Os valores de DO foram utilizados para estimar a curva de crescimento e comparar a influência dos diferentes tratamentos com nanopartículas metálicas.

Figura 5 - Crescimento de *Dunaliella salina* monitorado pela densidade óptica a 600 nm durante 7 dias de cultivo, sob diferentes concentrações de nanopartículas: (A) AgNPs; (B) ZnNPs e (C) TiNPs.



Fonte: Elaboração própria.

De maneira geral, os resultados corroboram os apresentados por Hassanpour *et al.* (2021), em que se observou um comportamento inicial de estímulo ao crescimento, seguido por declínio progressivo em concentrações mais elevadas e após períodos prolongados de exposição, indicando que a microalga apresenta tolerância inicial ao estresse, mas sensibilidade cumulativa ao longo do tempo.

Os resultados mostraram que o crescimento de *D. salina* apresentou respostas distintas aos diferentes tratamentos com nanopartículas metálicas, em comparação com os controles. Os dados sugerem que tanto a dose quanto o mecanismo de ação das NPs influenciam o

comportamento da microalga. Na concentração de $0,135 \times 10^9 \text{ NP} \cdot \text{mL}^{-1}$ (Figura 5A), observa-se que o tratamento com AgNPs apresentou uma queda acentuada da densidade óptica após o terceiro dia, atingindo valores significativamente menores do que os do controle.

Esse padrão indica um forte efeito inibitório da prata em altas concentrações, provavelmente associado ao estresse oxidativo, à liberação de íons Ag^+ e à interferência nos sistemas fotossintéticos, conforme relatado em estudos com microalgas expostas a AgNPs (Hazeem *et al.*, 2019; Miazal *et al.*, 20215; Rudi *et al.*, 2022; Thenarasu *et al.*, 2022). As AgNPs presentes em microalgas podem afetar a estrutura celular, reduzir a eficiência fotossintética e inibir o crescimento.

Por outro lado, os tratamentos com ZnNPs e TiNPs, na mesma concentração, apresentaram valores de DO mais próximos do controle, sugerindo maior tolerância da microalga às NPs. Essa resposta indica que, embora altas doses possam causar algum estresse celular, o impacto tende a ser menor do que o observado com a prata (Mawed *et al.*, 2022; Rudi *et al.*, 2022; Thenarasu *et al.*, 2022).

Enquanto as microalgas estavam em contato com as NPs na concentração de 2% (Figura 5B), os tratamentos com ZnNPs e TiNPs apresentaram crescimento comparável ou ligeiramente superior ao do controle até aproximadamente o quarto dia, sugerindo que, em concentrações moderadas, essas nanopartículas podem não ser tóxicas e até exercer efeito bioestimulante. Esse comportamento pode estar relacionado à liberação controlada de íons metálicos essenciais, como Zn^{2+} e Ti^{4+} , que atuam como cofatores enzimáticos e participam de processos fotossintéticos e antioxidantes (Lau *et al.*, 2022; Zakharova *et al.*, 2025), embora as nanopartículas biogênicas apresentem menor liberação de íons do que as de síntese química.

Já as AgNPs, na mesma condição, ainda promoveram redução do crescimento, porém menos aparente do que em 5%, o que confirma a maior sensibilidade de *D. salina* à prata (Komazec *et al.*, 2023).

Com 1 % de NPs, a densidade óptica dos tratamentos com ZnNPs e TiNPs mostrou-se mais eficiente do que o controle (Figuras 5B e 5C), indicando que a microalga conseguiu se adaptar ou neutralizar parcialmente o efeito das nanopartículas nessa dose reduzida. Em contraste, o tratamento com AgNPs manteve o crescimento reduzido, reforçando que, mesmo em concentrações mais baixas, a prata exerce efeito tóxico.

Tais achados estão alinhados ao princípio de dose-dependência observado em estudos de concentração-efeito de NPs em microalgas, como o de Wang *et al.* (2022). Na menor concentração testada (0,5 %), todos os tratamentos com AgNPs, ZnNPs e TiNPs apresentaram densidade óptica superior à do controle a partir do quarto dia, com pequenas variações. Isso

indica que, nessa faixa de dose reduzida, as nanopartículas não exerceram efeito adverso significativo sobre o crescimento de *D. salina*, sugerindo uma janela segura de aplicação ou uma tolerância fisiológica da microalga. Esse comportamento reforça a ideia de que a toxicidade de NPs depende fortemente da dose e do precursor metálico, conforme observado por Miazek *et al.* (2015).

Esses resultados indicam que, em concentrações moderadas, as nanopartículas podem não exercer efeito tóxico e até contribuir para o estímulo do crescimento das microalgas. Fato que pode estar relacionado à disponibilização gradual de íons metálicos (como Zn^{2+} e Ti^{4+}), que atuam como cofatores enzimáticos e participam de processos fotossintéticos e de defesa antioxidante (Thenarasu *et al.*, 2022; Zakharova *et al.*, 2025).

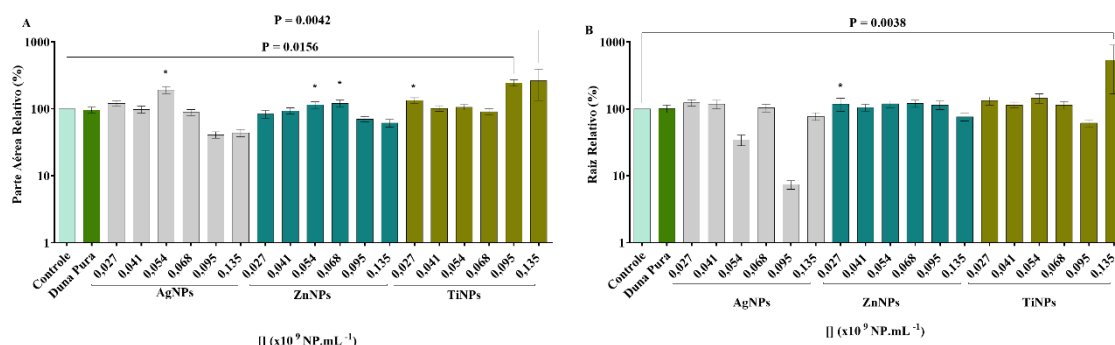
5.4 Avaliação de Germinação e Crescimento em Exposição às Nanopartículas

5.4.1 Germinação após exposição às nanopartículas

Para as avaliações de germinação *in vitro*, seis concentrações de nanopartículas ($0,027$; $0,041$; $0,054$; $0,068$; $0,095$ e $0,135 \times 10^9 \text{ NP} \cdot \text{mL}^{-1}$) foram aplicadas a sementes de feijão carioca (*Phaseolus vulgaris*) e de tomate-cereja (*Solanum lycopersicum*). Os resultados foram expressos como crescimento relativo (%), considerando o controle como 100%, e analisados por ANOVA seguida do teste de Dunnett ($\alpha = 0,05$), comparando cada tratamento diretamente ao controle.

De modo geral, as nanopartículas não comprometeram a germinação, indicando elevada viabilidade e ausência de efeito fitotóxico nas concentrações testadas. A maioria dos tratamentos não diferiu estatisticamente do controle ($p > 0,05$), sugerindo biocompatibilidade na fase inicial do desenvolvimento.

Figura 6 - Avaliação do crescimento e da germinação, e a comparação do tamanho médio da (A) parte aérea e (B) das raízes do feijão carioca. A diferença significativa considerada é $p < 0,05$.



Fonte: Elaboração própria.

Entre os tratamentos, as TiNPs apresentaram os efeitos mais consistentes sobre o crescimento inicial, com incremento significativo na concentração de $0,135 \times 10^9 \text{ NP}\cdot\text{mL}^{-1}$, tanto na parte aérea quanto no sistema radicular, além de tendência de aumento nas concentrações de 0,095 e $0,135 \times 10^9 \text{ NP}\cdot\text{mL}^{-1}$. O crescimento radicular atingiu aproximadamente 35% em relação ao controle, indicando possível efeito bioestimulante. Esse comportamento pode estar associado ao papel do titânio como elemento benéfico, capaz de modular o metabolismo oxidativo e favorecer a atividade fisiológica das plântulas (Thenarasu *et al.*, 2022; Zakharova *et al.*, 2025).

As ZnNPs promoveram incrementos moderados no crescimento, porém sem diferenças estatisticamente significativas. Esse padrão é compatível com o papel do zinco como micronutriente essencial, cuja absorção e homeostase são rigidamente reguladas pelas plantas, o que pode limitar respostas fisiológicas mais expressivas em condições não deficitárias (Kumar *et al.*, 2021; Thenarasu *et al.*, 2022).

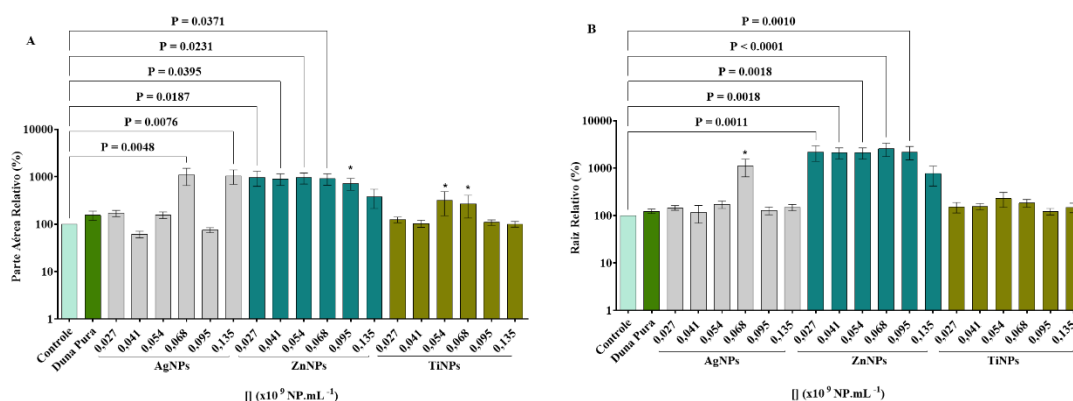
As AgNPs apresentaram comportamento mais variável. Em concentrações mais elevadas, observou-se tendência de redução no crescimento radicular, embora sem diferença significativa em relação ao controle. Em contraste, na concentração de $0,054 \times 10^9 \text{ NP}\cdot\text{mL}^{-1}$, verificou-se um aumento expressivo na parte aérea (84% a mais que o controle), ainda que sem significância estatística. Esse padrão sugere uma possível resposta caracterizada por estímulo em baixas doses e por potencial de inibição em doses mais elevadas. A ausência de significância pode estar relacionada à variabilidade biológica inerente aos ensaios de germinação (Mahana *et al.*, 2021).

Apesar de as AgNPs serem frequentemente associadas a efeitos fitotóxicos devido à liberação de íons Ag^+ e à geração de espécies reativas de oxigênio (Mahana *et al.*, 2021; Shantkriti *et al.*, 2023), tais efeitos não foram observados de forma consistente neste estudo. A presença de *D. salina* pode ter contribuído para mitigar possíveis impactos negativos, seja por adsorção superficial de íons metálicos, seja pela liberação de metabólitos antioxidantes capazes de reduzir o estresse oxidativo. Estudos demonstram que microalgas apresentam elevada capacidade de sequestro de metais e de reduzir sua biodisponibilidade no meio (Gao *et al.*, 2024; Lau *et al.*, 2022).

Em conjunto, os resultados indicam que as concentrações avaliadas são seguras para a germinação e o crescimento inicial do feijoeiro, sem promover alterações morfológicas relevantes. Observa-se, contudo, um potencial bioestimulante que depende do tipo de nanopartícula e da concentração aplicada, especialmente para TiNPs em concentrações mais elevadas. Investigações adicionais são necessárias para avaliar respostas fisiológicas mais

profundas, bem como o comportamento dessas nanopartículas em condições de cultivo e em campo, considerando a dinâmica de liberação, e a estabilidade e a interação com o solo.

Figura 7 - Avaliação do crescimento e da germinação, e a comparação do tamanho médio da (A) parte aérea e (B) das raízes do tomate-cereja. A diferença significativa considerada é $p < 0,05$



Fonte: Elaboração própria.

De modo geral, a germinação e o crescimento inicial das plântulas de tomate-cereja (*Solanum lycopersicum*), que variaram entre 29 e 28 sementes germinadas (de um total de 30) por tratamento, foram moduladas de acordo com o tipo de nanopartícula e a concentração aplicada.

O tratamento com extrato puro de *D. salina* não apresentou diferenças estatísticas em relação ao controle ($p > 0,05$), indicando que o veículo experimental não interferiu isoladamente no desenvolvimento das plântulas. Além disso, a maioria das concentrações testadas não promoveu redução significativa da germinação ou do crescimento, evidenciando a ausência de efeito fitotóxico nas condições avaliadas.

Entre os tratamentos, as ZnNPs apresentaram o efeito mais expressivo, promovendo aumentos estatisticamente significativos no crescimento relativo, especialmente da parte aérea, com valores médios entre 65% e 84% em relação ao controle ($p < 0,05$). Esse padrão sugere um efeito bioestimulante associado ao papel do zinco como micronutriente essencial, atuando como cofator enzimático, regulador da síntese proteica e modulador de fitormônios, particularmente auxinas, fundamentais para o crescimento inicial do tomateiro (Kumar *et al.*, 2021; Thenarasu *et al.*, 2022). A variação da resposta entre as concentrações reforça a natureza dose-dependente típica da aplicação de micronutrientes em escala nano.

Em contraste, as TiNPs e AgNPs apresentaram respostas mais variáveis e, na maioria das concentrações, não diferiram significativamente do controle. Embora nanopartículas de prata sejam frequentemente associadas a efeitos fitotóxicos devido à liberação de íons Ag^+ e à indução de estresse oxidativo, tais efeitos não foram observados de forma consistente neste

estudo. Esse resultado pode estar relacionado às baixas concentrações empregadas e à presença de *D. salina*, que pode atuar na mitigação da toxicidade por meio da adsorção de íons metálicos e da liberação de metabólitos antioxidantes (Mahana *et al.*, 2021; Lau *et al.*, 2022; Gao *et al.*, 2024).

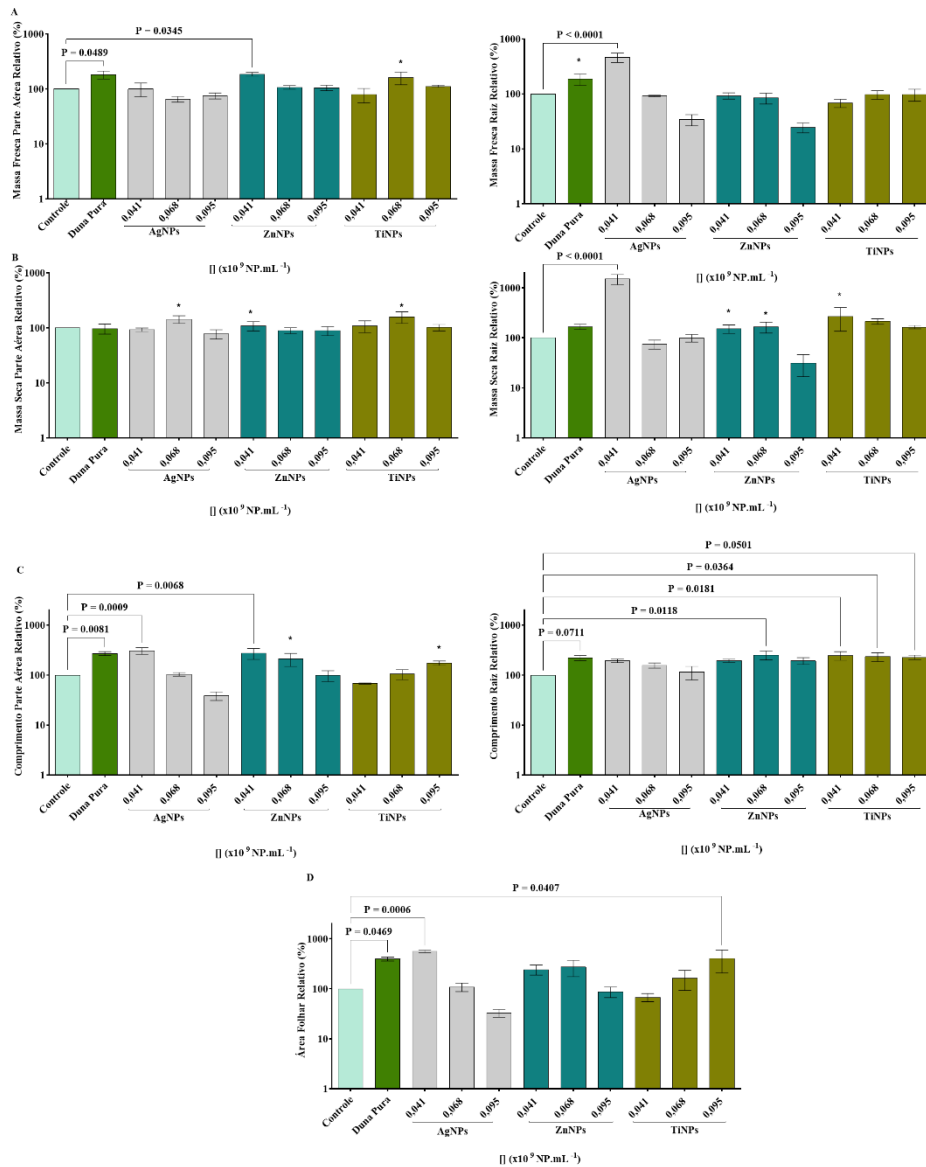
Observou-se, entretanto, que concentrações mais elevadas de AgNPs tendiam a reduzir o crescimento em comparação às doses intermediárias, sugerindo um possível limiar de tolerância fisiológica. Esse comportamento está de acordo com a literatura, que associa o excesso de prata ao desequilíbrio redox celular, à geração de espécies reativas de oxigênio (ROS) e à consequente inibição do crescimento vegetal (Tripathi *et al.*, 2017; Sharma *et al.*, 2012; Rai *et al.*, 2012). O extrato de *D. salina*, aplicado isoladamente, apresentou efeito estimulante discreto, indicando que compostos bioativos presentes na microalga, como pigmentos, antioxidantes e reguladores de crescimento, podem contribuir para o desenvolvimento vegetal (González-Pérez *et al.*, 2022; Kapoor *et al.*, 2022). Contudo, o efeito foi menos pronunciado em comparação às ZnNPs, sugerindo que a combinação entre o fornecimento mineral em nanoescala e a matriz biológica pode potencializar as respostas fisiológicas (Raliya *et al.*, 2017; Dimkpa *et al.*, 2017).

De forma geral, o tomateiro demonstrou maior sensibilidade positiva às ZnNPs, evidenciando que a suplementação controlada de zinco em escala nano pode favorecer o crescimento inicial da espécie. Esses resultados reforçam a importância do ajuste fino da dose e do tipo de nanopartícula, visando maximizar os efeitos bioestimulantes e minimizar riscos potenciais. Estudos complementares são necessários para avaliar a estabilidade dessas respostas em condições de cultivo e em estágios mais avançados de desenvolvimento.

5.4.2 Crescimento após exposição às nanopartículas

Foram analisados a massa fresca e seca da parte aérea e da raiz, a área foliar e o comprimento da parte aérea e do sistema radicular. Nos ensaios conduzidos em tubetes, foram avaliadas três concentrações de nanopartículas metálicas ($0,041$; $0,068$ e $0,095 \times 10^9 \text{ NP} \cdot \text{mL}^{-1}$), previamente selecionadas com base em resultados *in vitro*, nos quais não foram observados efeitos fitotóxicos significativos. A aplicação combinada de nanopartículas com biomassa de *D. salina* teve como objetivo investigar possíveis efeitos sobre o crescimento inicial das plântulas em condições semicontroladas, mais próximas da realidade de cultivo.

Figura 8 - Análises morfológicas das plantas de feijão carioca (*Phaseolus vulgaris*) expostas às nanopartículas; (A) Massa fresca da parte aérea e da raiz, (B) Massa seca da parte aérea e da raiz, (C) Comprimento da parte aérea e da raiz. (D) Área foliar. A diferença significativa considerada é $p < 0,05$.



Fonte:Elaboração própria

Foram analisados parâmetros morfológicos relacionados ao crescimento vegetativo, incluindo massa fresca e seca da parte aérea e da raiz, área foliar e comprimento da parte aérea e do sistema radicular (Figura 8). Para o feijoeiro (*Phaseolus vulgaris*), não foram observadas diferenças estatisticamente significativas em relação ao controle para a maioria dos parâmetros avaliados, indicando que as concentrações testadas não comprometeram o desenvolvimento das plantas em condições semicontroladas.

Embora não tenham sido detectadas diferenças significativas, observaram-se tendências discretas de aumento no comprimento radicular, na massa fresca da parte aérea e na massa seca das raízes, sugerindo um possível efeito bioestimulante de baixa magnitude. Esse padrão indica

que as nanopartículas apresentaram elevada biocompatibilidade, sem interferir negativamente no acúmulo de biomassa.

A estabilidade da massa seca é particularmente relevante, pois sugere que processos metabólicos fundamentais, como a fotossíntese e a assimilação de nutrientes, não foram prejudicados pela aplicação das nanopartículas. Resultados semelhantes têm sido relatados em leguminosas tratadas com nanomateriais de base biológica em baixas concentrações, reforçando a importância do ajuste adequado da dose para evitar efeitos fitotóxicos (Abinaya *et al.*, 2024; Singh *et al.*, 2024).

As variações pontuais observadas na massa fresca podem estar relacionadas a alterações no estado hídrico das plantas, uma vez que esse parâmetro é altamente sensível à absorção e retenção de água. Pequenas oscilações podem refletir respostas fisiológicas adaptativas, como ajustes osmóticos e modulação da permeabilidade das membranas celulares diante de estímulos externos leves, incluindo a presença de nanomateriais (Miranda *et al.*, 2024). De modo geral, os resultados indicam que as concentrações avaliadas se mantiveram em um perfil seguro para o crescimento vegetativo do feijoeiro. Contudo, os efeitos depender de ajustes na concentração, no modo de aplicação ou no período de exposição.

Os resultados obtidos para o tomateiro (*Solanum lycopersicum*) indicaram ausência de diferenças estatisticamente significativas em relação ao controle para a maioria dos parâmetros biométricos avaliados (Figura 8). De modo geral, a aplicação de nanopartículas não promoveu alterações expressivas no crescimento vegetativo.

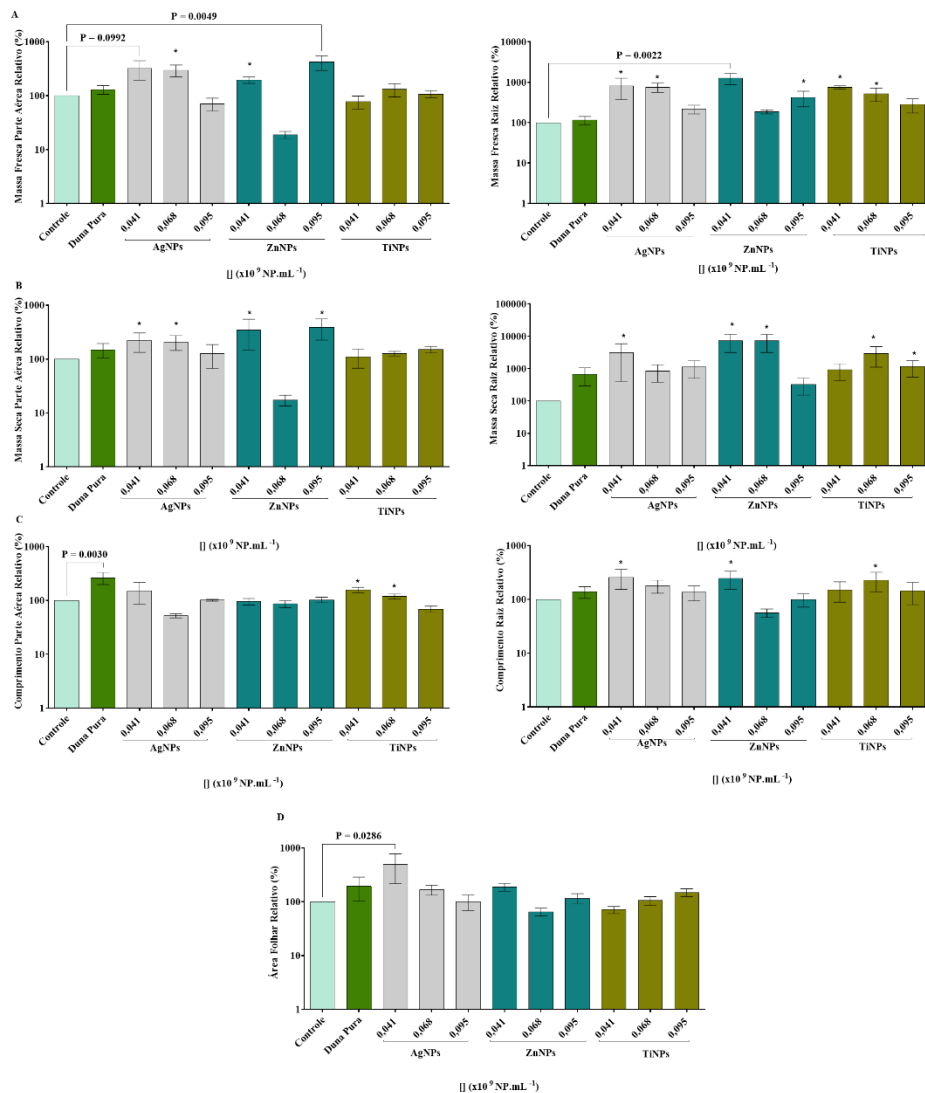
Apesar da ausência de significância estatística na maior parte dos tratamentos, observou-se um discreto incremento na massa fresca da parte aérea em algumas concentrações, sugerindo uma resposta fisiológica positiva, de baixa magnitude, à aplicação de nanopartículas em doses reduzidas. Esse comportamento indica que, em concentrações adequadas, as nanopartículas podem ser fisiologicamente toleradas sem comprometer o desenvolvimento inicial.

Em contraste, a maior concentração de ZnNPs ($0,095 \times 10^9$ NP·mL⁻¹) resultou em redução significativa da massa fresca da parte aérea e na concentração ($0,041 \times 10^9$ NP·mL⁻¹) no sistema radicular. Esse resultado sugere um possível efeito limiar de tolerância, no qual o aumento da dose pode induzir estresse oxidativo, comprometer a integridade das membranas celulares e alterar a fisiologia hídrica, reduzindo o acúmulo de água nos tecidos vegetais (Yingying *et al.*, 2025). Esse padrão reforça a natureza dose-dependente da resposta a nanopartículas metálicas. Por outro lado, a massa seca da parte aérea e da raiz permaneceu estável na maioria dos tratamentos, indicando que o acúmulo de biomassa estrutural foi menos

sensível às concentrações avaliadas. Essa estabilidade sugere a manutenção dos processos metabólicos essenciais e a possível capacidade adaptativa do tomateiro, que apresenta mecanismos eficientes de modulação antioxidante e de reparo celular (Sarsekeyeva *et al.*, 2024; Yingying *et al.*, 2025).

De modo geral, os resultados corroboram estudos que indicam que nanopartículas biogênicas, quando aplicadas em concentrações controladas, não promovem alterações morfofisiológicas significativas em culturas agrícolas (Abinaya *et al.*, 2024). Os dados reforçam a importância do ajuste da dose para equilibrar a segurança e o potencial bioestimulante.

Figura 9 - Análises morfológicas das plantas de Tomate cereja (*Solanum lycopersicum*) expostas às Nanopartículas; (A) Massa fresca da parte aérea e da raiz, (B) Massa seca da parte aérea e da raiz, (C) Comprimento da parte aérea e da raiz, (D) Área foliar. A diferença significativa considerada é $p < 0,05$.



Fonte: Elaboração própria.

Além disso, a presença de biomassa de *D. salina* pode ter contribuído para a estabilidade fisiológica observada, uma vez que as microalgas são reconhecidas como fontes de compostos bioativos e antioxidantes capazes de modular respostas ao estresse (Ronga *et al.*, 2019; Miranda *et al.*, 2024). A integração entre nanopartículas biogênicas e biomoléculas derivadas de microalgas, portanto, representa uma abordagem promissora, desde que respeitem os limites seguros de concentração.

Assim, ambas as espécies de sementes apresentaram elevada germinação e ausência de efeitos fitotóxicos expressivos nas concentrações avaliadas, indicando biocompatibilidade das nanopartículas associadas à biomassa de *D. salina*. O feijoeiro apresentou comportamento mais conservador, com respostas discretas e poucas diferenças significativas, destacando-se o leve estímulo radicular com TiNPs e estabilidade da massa seca, indicando manutenção do metabolismo estrutural.

O tomateiro, por sua vez, demonstrou maior sensibilidade às ZnNPs, com efeito bioestimulante em concentrações intermediárias e redução da massa fresca na maior dose testada, evidenciando resposta dose-dependente e possível limiar de tolerância. A estabilidade da massa seca em ambas as espécies sugere que os processos metabólicos essenciais não foram comprometidos. Assim, os resultados indicam potencial de aplicação em baixas concentrações, desde que sejam consideradas as particularidades fisiológicas de cada cultura e a definição adequada da dose.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo demonstrou a eficácia do uso da microalga *D. salina* na síntese biogênica de nanopartículas metálicas (AgNPs, ZnNPs e TiNPs), confirmando seu potencial como agente redutor e estabilizante natural. Os parâmetros obtidos na caracterização físico-química indicaram que a síntese das nanopartículas foi bem-sucedida, evidenciando a viabilidade do emprego de sistemas biológicos para a produção de nanomateriais.

O cultivo de *D. salina* também demonstrou eficiência como estratégia biotecnológica para o sequestro de dióxido de carbono (CO₂) atmosférico, reforçando seu potencial para a mitigação de emissões e para a promoção de processos alinhados à bioeconomia sustentável. Além disso, a biomassa microalgal mostrou-se promissora como fonte de compostos bioativos capazes de atuar na síntese e estabilização de nanopartículas.

A análise do crescimento microalgal indicou respostas diferenciadas aos tratamentos com nanopartículas. As TiNPs apresentaram menor toxicidade e maior biocompatibilidade, enquanto as AgNPs demonstraram maior efeito inibitório, evidenciando a importância do

controle de concentração para aplicações biotecnológicas e agrícolas. Nos ensaios de germinação e crescimento de sementes de feijão carioca (*Phaseolus vulgaris*) e tomate-cereja (*Solanum lycopersicum*), observou-se que as nanopartículas biossintetizadas, especialmente ZnNPs e TiNPs, apresentaram potencial bioestimulante, promovendo efeitos positivos no desenvolvimento radicular e no crescimento inicial das plantas.

A comparação geral dos resultados (Tabela 4) indicou comportamentos distintos entre os nanomateriais avaliados. As ZnNPs apresentaram maior estabilidade associada a respostas bioestimulantes mais pronunciadas, particularmente na germinação do tomateiro. As TiNPs demonstraram boa tolerância biológica e estímulo moderado ao crescimento vegetal. Em contrapartida, as AgNPs apresentaram maior potencial de toxicidade em concentrações elevadas, possivelmente relacionado à sua maior reatividade e ao conhecido efeito antimicrobiano.

Tabela 4 – Comparação do desempenho das nanopartículas nos diferentes ensaios.

Comparação dos resultados	AgNPs	ZnNPs	TiNPs	Melhor Desempenho
Caracterização físico-química	Ótima estabilidade coloidal	Ótima estabilidade coloidal	Boa estabilidade	AgNPs / ZnNPs
Crescimento DO	Maior toxicidade	Estável e bioestimulação	Boa tolerância e leve estímulo	ZnNPs
Germinação - feijão carioca (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	Leve redução em concentrações mais altas	Boa germinação	Leve estímulo ao crescimento	TiNPs
Germinação - tomate-cereja (<i>Solanum lycopersicum</i>)	Inibição em altas concentrações	Melhor resposta germinativa	Leve bioestimulação	ZnNPs

Com isso, os resultados obtidos evidenciam o potencial da integração entre microalgas e nanotecnologia para o desenvolvimento de insumos agrícolas sustentáveis, como biofertilizantes e bioestimulantes. Contudo, estudos adicionais são necessários para avaliar os efeitos de longo prazo, as concentrações ideais de aplicação e o comportamento ambiental dessas nanopartículas, garantindo sua segurança e eficácia em aplicações em larga escala.

7 CONCLUSÃO

Os resultados demonstraram que as nanopartículas metálicas associadas à biomassa de *D. salinam* apresentam comportamentos distintos quanto às suas propriedades físico-químicas e aos efeitos biológicos nas culturas avaliadas. De modo geral, AgNPs e ZnNPs apresentaram elevada estabilidade coloidal, enquanto as TiNPs mostraram estabilidade ligeiramente inferior.

Nos ensaios biológicos, as AgNPs evidenciaram maior potencial de toxicidade em concentrações elevadas, enquanto as ZnNPs apresentaram respostas bioestimulantes, especialmente na germinação do tomateiro. As TiNPs demonstraram boa tolerância fisiológica e leve estímulo ao crescimento vegetal, particularmente no feijoeiro.

De forma geral, os resultados indicam que o desempenho das nanopartículas depende tanto do tipo de material quanto da espécie vegetal avaliada, sendo as ZnNPs aquelas que apresentaram o melhor desempenho entre os tratamentos analisados. Portanto, este estudo reforça o potencial do uso de nanomateriais associados à biomassa microalgal como estratégia promissora para o desenvolvimento de insumos agrícolas mais sustentáveis, contribuindo para o avanço da biotecnologia verde e da nanotecnologia aplicada à agricultura.

8 REFERÊNCIAS

ABINAYA, Kanthavel et al. Impact of green carbon dot nanoparticles on seedling emergence, crop growth and seed yield in blackgram (*Vigna mungo* L. Hepper). **Scientific Reports**, v. 14, n. 1, 1 dez. 2024.

ABRAFRUTAS. Associação Brasileira dos Produtores e Exportadores de Frutas e Derivados. Quais são as frutas mais produzidas no Brasil? Brasília: Abrafrutas, 14 abr. 2023. Disponível em: <https://abrafrutas.org/2023/04/quais-sao-as-frutas-mais-produzidas-no-brasil/>.

AL JABRI, H. et al. Zinc oxide nanoparticles and their biosynthesis: Overview. **Life (Basel, Switzerland)**, v. 12, n. 4, p. 594, 2022.

ALVAREZ, A. L. et al. Microalgae, Soil And Plants: A Critical Review Of Microalgae As Renewable Resources. **Agriculture. Microalgal Research**, v. 54, n. 102200, p. 102200, 2021.

ASHOUR, M. et al. Usage of Chlorella and diverse microalgae for CO₂ capture - towards a bioenergy revolution. **Frontiers in bioengineering and biotechnology**, v. 12, p. 1387519, 2024.

BAKER, S.; VOLOVA, T.; PRUDNIKOVA, SV.; et al. Nanoagroparticles Emerging Trends And Future Prospect In Modern Agriculture System. **Environ Toxicol Pharmacol**, V. 53, p10-17, 2017.

BALAFOUTIS, A. et al. Precision agriculture technologies positively contributing to GHG emissions mitigation, farm productivity and economics. **Sustainability**, v. 9, n. 8, p. 1339, 2017.

BALUSAMY, Sri Renukadevi et al. Advancing sustainable agriculture: a critical review of smart and eco-friendly nanomaterial applications. **Journal of NanobiotechnologyBioMed Central Ltd**, , 1 dez. 2023.

BARBOSA, M. et al. The microalga *Dunaliella* and its applications: a review. **Applied Phycology**, v. 4, n. 1, p. 99–120, 2023.

BARBOSA, V. C. R. Prospecções de tecnologias sustentáveis da Embrapa para o agronegócio brasileiro. 306 f. Dissertação (Mestrado em Agronegócios) – Universidade de Brasília, Brasília, 2022. Disponível em: <http://repositorio.unb.br/handle/10482/46605>.

BATOOL, A. et al. **Green synthesis of Zn-doped TiO₂ nanoparticles from *Zanthoxylum armatum***. **BMC plant biology**, v. 24, n. 1, p. 820, 2024.

BAYAT, M., et al. Síntese Biogênica Fácil e Caracterização de Sete Nanopartículas Baseadas em Metais Conjugadas com Bioativos Fitoquímicos Utilizando Extrato de Folha de *Fragaria ananassa*. **Moléculas**, v. 26, n. 10, p. 3025, 2021.

BEIGBEDER, J.-B. et al. CO₂ Capture And Inorganic Carbon Assimilation Of Gaseous Fermentation Effluents Using *Parachlorella Kessleri* Microalgae. **Journal of CO₂ utilization**, v. 50, n. 101581, p. 101581, 2021.

BHATTACHARYA, J. et al. Microbially synthesized nanoparticles: aspect in plant disease management. In: **Biocontrol Mechanisms of Endophytic Microorganisms**. [s.l.] Elsevier, 2022. p. 303–325.

BIHAR M. AL-ANI1; THAMER M. BADAWI. Efficiency of Nanofertilizers in plant (Review). **Journal of Education for Pure Science**, v. 15, n. 3, 1 set. 2025.

BILESKY-JOSÉ et al. Biogenic A-Fe₂O₃ Nanoparticles Enhance The Biological Activity Of *Trichoderma* Against The Plant Pathogen *Sclerotinia Sclerotiorum*. **ACS Química e Engenharia Sustentável**, V. 9, n. 4, p. 1669-1683.

BOROVKOV, A. B. et al. Productivity and morphometric parameters of the microalga *Dunaliella salina* IBSS-2 under pilot cultivation in continental mid-latitude climate in spring. **3 biotech**, v. 11, n. 10, p. 438, 2021.

CALVO, Pamela; NELSON, Louise; KLOEPPER, Joseph W. **Agricultural uses of plant biostimulants**. *Plant and soil*, v. 383, n. 1–2, p. 3–41, 2014.

CAO, Yahan *et al.* Nanoparticles as catalysts of agricultural revolution: enhancing crop tolerance to abiotic stress: a review. **Frontiers in Plant Science Frontiers Media SA**, , 2024.

CASANOVA, Livia Marques et al. The potential of allelochemicals from microalgae for biopesticides. **Plants**, v. 12, n. 9, p. 1896, 2023.

CHAN, S. S. et al. Recent Advances Biodegradation And Biosorption Of Organic Compounds From Wastewater: Microalgae-Bacteria Consortium - A Review. **Bioresource technology**, v. 344, n. 126159, p. 126159, 2022.

CHEN, Hao et al. A Review on Industrial CO₂ Capture through Microalgae Regulated by Phytohormones and Cultivation Processes. **EnergiesMDPI**, , 1 jan. 2023.

CHEN, Y.; XU, C.; VAIDYANATHAN, S. Microalgae: A Robust “Green Bio-Bridge” Between Energy And Environment. **Critical reviews in biotechnology**, v. 38, n. 3, p. 351–368, 2018.

CHENG, P. et al. Integrated Marine Microalgae Biorefineries For Improved Bioactive Compounds: A Review. **The Science of the total environment**, v. 817, n. 152895, p. 152895, 2022.

CHISTI, Y. Biodiesel from microalgae. **Biotechnology advances**, v. 25, n. 3, p. 294–306, 2007.

CHOUDHARY, M.; JONES, J. B.; PARET, M. L. Natural or green synthesis nanomaterials and impact on plant pathogens. In: Nanotechnology-Based Sustainable Alternatives for the Management of Plant Diseases. [s.l.] **Elsevier**, 2022. p. 5–29.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos 2023. Brasília: **Conab**, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/safra-de-graos>.

COSTA, J. A. V. et al. Potential Of Microalgae As Biopesticides To Contribute To Sustainable Agriculture And Environmental Development. **Journal of environmental science and health. Part. B, Pesticides, food contaminants, and agricultural wastes**, v. 54, n. 5, p. 366–375, 2019.

CUELLAR-BERMUDEZ, S. P. et al. Photosynthetic Bioenergy Utilizing Co₂: An Approach On Flue Gases Utilization For Third Generation Biofuels. **Journal of cleaner production**, v. 98, p. 53–65, 2015.

DANIEL, Augustine Innalegwu *et al.* Application of nanotechnology and proteomic tools in crop development towards sustainable agriculture. **Journal of Crop Science and Biotechnology Springer**, , 1 jun. 2024.

DE JESUS, P. D. C. Uso De Microalgas Tolerantes A Altas Concentrações De CO Conversão De CO Em Bioprodutos De Alto Valor Agregado. São Paulo: Escola Politécnica de São Paulo, 2020.

DE MORAIS, Etiele Greque *et al.* Biomass valorization via pyrolysis in microalgae-based wastewater treatment: Challenges and opportunities for a circular bioeconomy. *Journal of Applied Phycology* Springer Science and Business Media B.V., , 1 dez. 2023.

DIMKPA, C. O.; BINDRABAN, P. S. Nanofertilizers: new products for the industry? **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 65, n. 12, p. 2347–2353, 2017.

DMYTRYK, A.; CHOJNACKA, K. Algae as fertilizers, biostimulants, and regulators of plant growth. In: *Algae Biomass: Characteristics and Applications*. **Cham: Springer International Publishing**, 2018. p. 115–122.

DO, J.-M.; HONG, J. W.; YOON, H.-S. Microalgae-mediated green synthesis of silver nanoparticles: a sustainable approach using extracellular polymeric substances from *Graesiella emersonii* KNUA204. **Frontiers in microbiology**, v. 16, p. 1589285, 2025.

EL BILALI, Hamid; STRASSNER, Carola; BEN HASSEN, Tarek. Sustainable agri-food systems: Environment, economy, society, and policy. **Sustainability (Switzerland)MDPI AG**, , 1 jun. 2021.

EL OUARDY, K. et al. Biosynthesis and Characterization of Silver Nanoparticles Produced by *Parachlorella kessleri* and *Cyclotella* spp., and the Evaluation of Their Antibacterial Activity. **International journal of molecular sciences**, v. 24, n. 13, 2023.

ELALAMI, Doha; OUKARROUM, Abdallah; BARAKAT, Abdellatif. Anaerobic digestion and agronomic applications of microalgae for its sustainable valorization. **RSC Advances Royal Society of Chemistry**, , 20 jul. 2021.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Dados econômicos: soja no Brasil. Londrina: **Embrapa Soja**, 2023. Disponível em: <https://www.embrapa.br/soja/cultivos/soja1/dados-economicos>.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Dinâmica agrícola no Cerrado: análises e projeções. Brasília: **Embrapa**, 2020. Disponível em: <https://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/1121716/1/LVDINAMICAAGRICOLACERRADO2020.pdf>.

ESPOIR, D. K.; SUNGE, R. CO2 Emissions And Economic Development In Africa: Evidence From A Dynamic Spatial Panel Model. **Journal of environmental management**, v. 300, n. 113617, p. 113617, 2021.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. World food and agriculture: statistical yearbook 2022. Roma: **FAO**, 2022. Disponível em: <https://www.fao.org/worldfoodsituation/foodfiscal-yearbook/2022>.

FAYYAD, R. J.; ALI ALANISI, E. M. A.; MOHAMMED ALI, A. N. Algae-mediated green synthesis of dextran-coated titanium nanoparticles and their cytotoxic potential against MCF7 breast cancer cells. **Reports of biochemistry & molecular biology**, v. 13, n. 3, p. 358–367, 2024.

FILIPE, V.; HAWE, A.; JISKOOT, W. Critical evaluation of nanoparticle tracking analysis (NTA) by NanoSight for the measurement of nanoparticles and protein aggregates. **Pharmaceutical research**, v. 27, n. 5, p. 796–810, 2010.

GAGLIARDI, C. Nanotecnologia aplicada à produção agrícola: uma análise acerca dos aspectos sociais e sustentáveis no âmbito brasileiro. In: **Desafios e inovações no agronegócio**. São Paulo, 2023.

GAO, Mingze *et al.* Toxicity, physiological response, and biosorption mechanism of *Dunaliella salina* to copper, lead, and cadmium. **Frontiers in microbiology**, v. 15, p. 1374275, 2024.

GATOU, M.-A. et al. ZnO nanoparticles from different precursors and their photocatalytic potential for biomedical use. **Nanomaterials (Basel, Switzerland)**, v. 13, n. 1, p. 122, 2022.

GAUTAM, K. et al. Microalgal Applications Toward Agricultural Sustainability: Recent Trends And Future Prospects. In: GALANAKIS, C. M. (Ed.). **Microalgae**. San Diego, CA: Elsevier, 2021. p. 339–379.

GHAZAEI, F.; SHARIATI, M. Effects of titanium nanoparticles on the photosynthesis, respiration, and physiological parameters in *Dunaliella salina* and *Dunaliella tertiolecta*. **Protoplasma**, v. 257, n. 1, p. 75–88, 2020.

GHEDA, S. F.; AHMED, D. A. Improved soil characteristics and wheat germination as influenced by inoculation of *Nostoc kihlmani* and *Anabaena cylindrica*. **Rendiconti lincei. Scienze fisiche e naturali**, v. 26, n. 2, p. 121–131, 2015.

GHOSH et al. Dipankar Et Al. Microalgal Biofertilizer Towards Green Sustainable Agriculture. **New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering**. [S.l.]: Elsevier, 2022. p. 27–45.

GITAU, M. M. et al. Evaluation of the biostimulant effects of two Chlorophyta microalgae on tomato (*Solanum lycopersicum*). **Journal of cleaner production**, v. 364, n. 132689, p. 132689, 2022.

GÓMEZ-PINCHETTI, J. L. et al. Photosynthetic characteristics of *Dunaliella salina* (Chlorophyceae, Dunaliellales) in relation to β -carotene content. **Journal of applied phycology**, v. 4, n. 1, p. 11–15, 1992.

GONÇALVES, João et al. Microalgae as Biofertilizers: A Sustainable Way to Improve Soil Fertility and Plant Growth. Sustainability (Switzerland) Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), , 1 ago. 2023.

GONZALEZ ORTIZ, F. A.; TORRENEGRA ESCORCIA, D.; ALBIS ARRIETA, A. R. Biosynthesis of silver nanoparticles with *Chlorella sp.* **Characterization and application of nanomaterials**, v. 5, n. 1, p. 100, 2022.

GONZÁLEZ-PÉREZ, B. K. et al. Microalgae As Biostimulants: A New Approach In Agriculture. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 38, n. 1, 2022.

GUARDIOLA-MÁRQUEZ, C. E. et al. Development and evaluation of zinc and iron nanoparticles functionalized with plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) and microalgae for their application as bio-nanofertilizers. **Plants**, v. 12, n. 20, p. 3657, 2023.

GUILGER-CASAGRANDE, Mariana et al. Effects of biogenic silver and iron nanoparticles on soybean seedlings (*Glycine max*). **BMC Plant Biology**, v. 22, n. 1, 1 dez. 2022.

GUILGER-CASAGRANDE, Mariana; DE LIMA, Renata. Biogenic synthesis of nanoparticles and their biological applications. In: Advances in Nano-Fertilizers and Nano-Pesticides in Agriculture. **Elsevier**, 2021. p. 361–384.

GUILLARD, R.R.L. 1975. Culture Of Phytoplankton For Feeding Marine Invertebrates. In Smith W.L. and Chanley M.H (Eds.) **Culture of Marine Invertebrate Animals**. Plenum Press, New York, USA. p 26- 60.

GUILLARD, R.R.L. et al. Studies Of Marine Planktonic Diatoms. I. Cyclotella Nana Hustedt And Detonula Confervacea Cleve. Can. J. **Microbiol.** 8: 229-239, 1962.

GÜNERKEN, E. et al. Cell Disruption For Microalgae Biorefineries. **Biotechnology advances**, v. 33, n. 2, p. 243–260, 2015.

HADI, S. I. I. et al. Identificação molecular e criopreservação de microalgas verdes (Chlorophyta) isoladas de águas continentais brasileiras. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1015640/1/DissertacaofinalSamedHadi1.pdf>. Acesso em: 12 nov. 2023.

HAIDER, M. B.; MAHESHWARI, P.; KUMAR, R. CO₂ Capture From Flue Gas Using Phosphonium Based Deep Eutectic Solvents: Modeling and simulation approach. **Journal of environmental chemical engineering**, v. 9, n. 6, p. 106727, 2021.

HAMEED, H. et al. Green synthesis of zinc oxide (ZnO) nanoparticles from green algae and their assessment in various biological applications. **Micromachines**, v. 14, n. 5, 2023.

HAMIDA, R. S. et al. Green synthesis of hexagonal silver nanoparticles using a novel microalgae *Coelastrella aeroterrestica* strain BACHlo4 and resulting anticancer, antibacterial, and antioxidant activities. **Pharmaceutics**, v. 14, n. 10, p. 2002, 2022.

HASANAKLOU, N. T. et al. Seed nano-priming using silica nanoparticles: effects in seed germination and physiological properties of *Stevia Rebaudiana* Bertoni. **Chemical and biological technologies in agriculture**, v. 10, n. 1, 2023.

HASANUZZAMAN, Mirza et al. Reactive oxygen species and antioxidant defense in plants under abiotic stress: Revisiting the crucial role of a universal defense regulator. **Antioxidants MDPI**, , 1 ago. 2020.

HAZEEM, Layla J. *et al.* Toxicity effect of silver nanoparticles on photosynthetic pigment content, growth, ROS production and ultrastructural changes of microalgae *Chlorella vulgaris*. **Nanomaterials** (Basel, Switzerland), v. 9, n. 7, p. 914, 2019.

HAZEEM, Layla. Single and combined toxicity effects of zinc oxide nanoparticles: Uptake and accumulation in marine microalgae, toxicity mechanisms, and their fate in the marine environment. **Water**, v. 14, n. 17, p. 2669, 2022.

HU, Ji et al. Effect of TiO₂ nanoparticle aggregation on marine microalgae *Isochrysis galbana*. **Journal of Environmental Sciences (China)**, v. 66, p. 208–215, 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jes.2017.05.026>>.

HYRSLOVA, I. et al. Functional properties of *Dunaliella salina* and its positive effect on probiotics. **Marine drugs**, v. 20, n. 12, p. 781, 2022.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Levantamento Sistemático da Produção Agrícola (LSPA). Rio de Janeiro: **IBGE**, 2023. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/home/lspa>.

JIANG, M.; SONG, Y.; KANWAR, MK.; et al. Phytonanotechnology Applications In Modern Agriculture. **J Nanobiotechnology**. V. 19, p. 430, 2021.

JO, C. R. et al. Taxonomical, physiological, and biochemical characteristics of *Dunaliella salina* DSTA20 from hypersaline environments of Taean salt pond, Republic of Korea. **Microorganisms**, v. 12, n. 12, 2024.

KAPOOR, R. et al. Microalgae as biofertilizers: current status and future prospects. **Journal of Applied Phycology**, v. 34, p. 1–20, 2022.

KHEZRI, M.; HESHMATI, A.; KHODAEI, M. Environmental Implications Of Economic Complexity And Its Role In Determining How Renewable Energies Affect CO2 Emissions. **Applied energy**, v. 306, n. 117948, p. 117948, 2022.

KIM, S. W. et al. Antifungal effects of silver nanoparticles (AgNPs) against various plant pathogenic fungi. **Mycobiology**, v. 40, n. 1, p. 53-58, 2012.

KOMAZEC, Bruno *et al.* The occurrence of oxidative stress induced by silver nanoparticles in *Chlorella vulgaris* depends on the surface-stabilizing agent. **Nanomaterials** (Basel, Switzerland), v. 13, n. 13, p. 1967, 2023.

KOPITTKE, Peter M. et al. Nanomaterials as fertilizers for improving plant mineral nutrition and environmental outcomes. **Environmental science. Nano**, v. 6, n. 12, p. 3513–3524, 2019.

KRISHNAMOORTHY, S.; KUPPAM, C.; MAMILLA R., C. R. Evaluation of carbon capture methodologies, mechanisms, and improvements for sustainable carbon dioxide mitigation using microalgae. **Industrial biotechnology** (New Rochelle, N.Y.), v. 20, n. 5, p. 186–203, 2024.

KUMAR, A. et al. Biochar aging in contaminated soil promotes Zn immobilization due to changes in biochar surface structural and chemical properties. **The Science of the total environment**, v. 626, p. 953–961, 2018.

LADE, S. J. et al. Human impacts on planetary boundaries amplified by Earth system interactions. **Nature sustainability**, v. 3, n. 2, p. 119–128, 2019.

LAU, Z. L. et al. A review on the diverse interactions between microalgae and nanomaterials: Growth variation, photosynthetic performance and toxicity. **Bioresource technology**, v. 351, n. 127048, p. 127048, 2022.

LEE, Yuan-Kun. Microalgal mass culture systems and methods: Their limitation and potential. **Journal of applied phycology**, v. 13, n. 4, p. 307–315, 2001.

LIU, Hanyu et al. Synergistic photocatalytic oxidation and adsorption boost arsenic removal by in-situ carbon-doped TiO₂ and nitrogen deficiency C₃N₄ heterojunction. **Journal of Environmental Management**, v. 348, 15 dez. 2023.

LOZANO-GARCIA, D. F. et al. Potential Land Microalgae Cultivation In Mexico: From Food Production To Biofuels. **Algal research**, v. 39, n. 101459, p. 101459, 2019.

MAHANA, Abhijeet; GULIY, Olga I.; MEHTA, Surya Kant. Accumulation and cellular toxicity of engineered metallic nanoparticle in freshwater microalgae: Current status and future challenges. **Ecotoxicology and Environmental Safety Academic Press**, , 15 jan. 2021.

MANIMARAN, M.; KANNABIRAN, K. Actinomycetes-Mediated Biogenic Synthesis Of Metal And Metal Oxide Nanoparticles: Progress And Challenges. **Letters in Applied Microbiology**, v.64, p.401-408, 2017.

MANZOOR, Natasha et al. Recent Advancements and Development in Nano-Enabled Agriculture for Improving Abiotic Stress Tolerance in Plants. **Frontiers in Plant Science Frontiers Media S.A.**, , 11 jul. 2022.

MATOUKE, M. M.; ELEWA, D. T.; ABDULLAHI, K. Binary effect of titanium dioxide nanoparticles (nTio₂) and phosphorus on microalgae (*Chlorella 'Ellipsoides* Gerneck, 1907). **Aquatic toxicology** (Amsterdam, Netherlands), v. 198, p. 40–48, 2018.

MAWED, S. A. et al. *Dunaliella salina* microalga restores the metabolic equilibrium and ameliorates the hepatic inflammatory response induced by zinc oxide nanoparticles (ZnO-NPs) in male zebrafish. **Biology**, v. 11, n. 10, p. 1447, 2022.

MAZHAR, R. et al. Fostering sustainable agriculture: Do institutional factors impact the adoption of multiple climate-smart agricultural practices among new entry organic farmers in Pakistan? **Journal of cleaner production**, v. 283, n. 124620, p. 124620, 2021.

MEENA, R. S.; LAL, R.; YADAV, G. S. Long-Term Impact Of Topsoil Depth And Amendments On Carbon And Nitrogen Budgets In The Surface Layer Of An Alfisol In Central Ohio. **Catena**, v. 194, n. 104752, p. 104752, 2020.

MEHMOOD, A. Brief overview of the application of silver nanoparticles to improve growth of crop plants. **IET nanobiotechnology**, v. 12, n. 6, p. 701–705, 2018.

MIAZEK, Krystian *et al.* Effect of metals, metalloids and metallic nanoparticles on microalgae growth and industrial product biosynthesis: A review. **International journal of molecular sciences**, v. 16, n. 10, p. 23929–23969, 2015.

MIRANDA, A. M. et al. Trends on CO₂ capture with microalgae: A bibliometric analysis. *Molecules* (Basel, Switzerland), v. 27, n. 15, p. 4669, 2022.

MIRANDA, Alejandra M. et al. Advances in the Development of Biofertilizers and Biostimulants from Microalgae. *Biology Multidisciplinary Digital Publishing Institute* (MDPI), 1 mar. 2024.

MISHRA, D. N.; PRASAD, L. Comparing zinc salts for biosynthesis of ZnO nanoparticles using *Trichoderma harzianum*: Zinc acetate dihydrate vs. zinc nitrate hexahydrate. **International Journal of Advanced Biochemistry Research**, v. 9, n. 4, p. 859–862, 2025.

MORA-GODÍNEZ, S.; ABRIL-MARTÍNEZ, F.; PACHECO, A. Green synthesis of silver nanoparticles using microalgae acclimated to high CO₂. **Materials today: proceedings**, v. 48, p. 5–9, 2022.

MORA-GODÍNEZ, S.; CONTRERAS-TORRES, F. F.; PACHECO, A. Characterization of silver nanoparticle systems from microalgae acclimated to different CO₂ atmospheres. **ACS omega**, v. 8, n. 24, p. 21969–21982, 2023.

MUTAF, T. et al. Green synthesis of titanium nanoparticles using a sustainable microalgal metabolite solution for potential biotechnological activities. **Asia-Pacific journal of chemical engineering**, v. 18, n. 5, 2023.

NAZARI, M. T. et al. Microalgae harvesting by fungal-assisted bioflocculation. **Reviews in environmental science and bio/technology**, v. 19, n. 2, p. 369–388, 2020.

PARMAR, P. et al. Microalgae as next generation plant growth additives: Functions, applications, challenges and circular bioeconomy based solutions. **Frontiers in plant science**, v. 14, p. 1073546, 2023.

PRASAD, Ravindra et al. Role of microalgae in global CO₂ sequestration: Physiological mechanism, recent development, challenges, and future prospective. **Sustainability (Switzerland) MDPI**, , 1 dez. 2021.

PROSEKOV, A. et al. Functional properties of the enzyme-modified protein from oat bran. **Food bioscience**, v. 24, p. 46–49, 2018.

PUGLISI, I. et al. Biostimulant Activity Of Humic-Like Substances From Agro-Industrial Waste On *Chlorella Vulgaris* And *Scenedesmus Quadricauda*. **European journal of phycology**, v. 53, n. 3, p. 433–442, 2018.

PUGLISI, Ivana et al. Biostimulant activity of humic-like substances from agro-industrial waste on *Chlorella vulgaris* and *Scenedesmus quadricauda*. **European Journal of Phycology**, v. 53, n. 3, p. 433–442, 2018.

RAI, M.; YADAV, A.; GADE, A. Silver nanoparticles as a new generation of antimicrobials. **Biotechnology Advances**, v. 27, n. 1, p. 76–83, 2009.

RALIYA, R.; TARAFDAR, J. C. ZnO nanoparticle biosynthesis and its effect on phosphorous-mobilizing enzyme secretion and gum contents in clusterbean (*Cyamopsis tetragonoloba L.*). **Agricultural Research**, v. 6, p. 1–8, 2017.

RAMAKRISHNAN, Balasubramanian et al. Potential of microalgae and cyanobacteria to improve soil health and agricultural productivity: a critical view. **Environmental Science: Advances Royal Society of Chemistry**, , 15 fev. 2023.

RANDERS, J. et al. Achieving the 17 Sustainable Development Goals within 9 planetary boundaries. **Global sustainability**, v. 2, n. e24, 2019.

REZVANI, F.; SARRAFZADEH, M.-H.; OH, H.-M. Hydrogen Producer Microalgae In Interaction With Hydrogen Consumer Denitrifiers As A Novel Strategy For Nitrate Removal From Groundwater And Biomass Production. **Algal research**, v. 45, n. 101747, p. 101747, 2020.

RIZWAN, Muhammad et al. Zinc and iron oxide nanoparticles improved the plant growth and reduced the oxidative stress and cadmium concentration in wheat. **Chemosphere**, v. 214, p. 269–277, 2019.

ROCHA, L. N. Estudo Da Concentração De Biomassa De Microalgas Por Filtração E Floculação. **Centro de Tecnologia e Ciência/ Instituto de Química**: Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2010.

RONGA, Domenico et al. Microalgal biostimulants and biofertilisers in crop productions. **Agronomy MDPI AG**, , 15 abr. 2019.

RUDI, Ludmila *et al.* Effects of silver nanoparticles on the red microalga *Porphyridium purpureum* CNMN-AR-02, cultivated on two nutrient media. **Marine drugs**, v. 22, n. 5, p. 208, 2024.

RUPAWALLA, Z. et al. Germination screen for microalgae-generated plant growth biostimulants. **Algal research**, v. 66, n. 102784, p. 102784, 2022.

SHANTKRITI et al. Bioynthesis of silver nanoparticles using *Dunaliella salina* and its antibacterial applications. **Applied Surface Science Advances**, v. 13, n. 100377, p. 100377, 2023.

SABNAM, S.; MONDAL, A.; PAUL, S. Advancing seed priming with algal extracts: A review of mechanistic roles in seed germination and plant growth. **Explora: Environment and Resource**, v. 2, n. 2, p. 025120025, 2025.

SAFI, Carl *et al.* Morphology, composition, production, processing and applications of *Chlorella vulgaris*: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 35, p. 265–278, 2014.

SALMERON COVARRUBIAS, L. P. et al. Advanced nanoenabled microalgae systems: Integrating oxidative stress-induced metabolic reprogramming and enhanced lipid biosynthesis for next-generation biofuel production. **ACS applied bio materials**, v. 8, n. 4, p. 3513–3524, 2025.

SÁNCHEZ-QUINTERO, Ángela; FERNANDES, Susana C. M.; BEIGBEDER, Jean-Baptiste. Overview of microalgae and cyanobacteria-based biostimulants produced from wastewater and CO₂ streams towards sustainable agriculture: A review. **Microbiological Research**, v. 277, n. 127505, p. 127505, 2023.

SANTOS, Nair Hildelgard Soares Dos et al. Efeito do extrato de algas no desempenho germinativo e crescimento radicular em sementes de feijão BRS Estilo em resposta a diferentes métodos de aplicação. **Hoehnea**, v. 48, 2021.

SARSEKEYEVA, Fariza K. et al. Microalgae- and cyanobacteria-derived phytostimulants for mitigation of salt stress and improved agriculture. **Algal research**, v. 82, n. 103686, p. 103686, 2024.

SEABRA, A.; HADDAD, P.; DURAN, N. et al. Biogenic Synthesis of Nanostructured Iron Compounds: Application And Perspectives. **IET Nanobiotechnology**, v.7, p.90-99, 2013.

SERVIN, Alia D. et al. Synchrotron verification of TiO₂ accumulation in cucumber fruit: a possible pathway of TiO₂ nanoparticle transfer from soil into the food chain. **Environmental science & technology**, v. 47, n. 20, p. 11592–11598, 2013.

SHANG, Yifen. et al. “Applications Of Nanotechnology In Plant Growth And Crop Protection: A Review.” **Molecules**, V. 24(14), p.2558, 2019.

SHANTKRITI et al. Bioynthesis of silver nanoparticles using *Dunaliella salina* and its antibacterial applications. **Applied Surface Science Advances**, v. 13, n. 100377, p. 100377, 2023.

SHARMA K. GULSHAN. et al. Nutrient Sequestration And Phycoremediation Of Sewage Waste Water By Selective Microalgae. Centre For Environment Science And Climate Resilient Agriculture (CESCRA)/ Ndiian Agricultural Research Institute (IARI), New Delhi. India, p. 110 012, 2014.

SHI, H. et al. Antifungal activity and mechanisms of AgNPs and its combination with azoxystrobin against *Magnaporthe oryzae*. **Environmental science. Nano**, v. 10, n. 9, p. 2412–2426, 2023.

SHRESTHA, Ram Chandra et al. The effects of microalgae-based fertilization of wheat on yield, soil microbiome and nitrogen oxides emissions. **The Science of the Total Environment**, v. 806, n. Pt 3, p. 151320, 2022.

SIDOROWICZ, Agnieszka et al. Nanoparticles from microalgae and their biomedical applications. **Marine Drugs**, v. 21, n. 6, p. 352, 2023.

SINGH, Namita Ashish et al. Nanoparticles synthesis via microorganisms and their prospective applications in agriculture. **Plant Nano Biology Elsevier B.V.**, , 1 ago. 2023.

SINGH, P. et al. Biological synthesis of nanoparticles from plants and microorganisms. **Trends in biotechnology**, v. 34, n. 7, p. 588–599, 2016.

SPANOS, Alexandros et al. Functionalized magnetic nanomaterials in agricultural applications. **Nanomaterials MDPI**, 1 nov. 2021.

SRIMONGKOL, Piroonporn et al. Microalgae-based wastewater treatment for developing economic and environmental sustainability: Current status and future prospects. **Frontiers in Bioengineering and Biotechnology**, v. 10, p. 904046, 2022.

STADNIK, M. J.; FREITAS, M. B. DE. Algal polysaccharides as source of plant resistance inducers. **Tropical plant pathology**, v. 39, n. 2, p. 111–118, 2014.

TAHERZADEH SOURESHJANI, P.; SHADI, A.; MOHAMMADSALEH, F. Algae-mediated route to biogenic cuprous oxide nanoparticles and spindle-like CaCO₃: a comparative study, facile synthesis, and biological properties. **RSC advances**, v. 11, n. 18, p. 10599–10609, 2021.

TEH, H. Y. et al. Synthesis of silver nanoparticles from microalgae for potential photocatalytic dye removal. IOP conference series. **Materials science and engineering**, v. 1257, n. 1, p. 012025, 2022.

TERRA, A. L. M. et al. Microalgae biosynthesis of silver nanoparticles for application in the control of agricultural pathogens. *Journal of environmental science and health. Part. B, Pesticides, food contaminants, and agricultural wastes*, v. 54, n. 8, p. 709–716, 2019.

THENARASU, Arularasi et al. Effect of titanium, silver and zinc nanoparticles on microalgae in the aquatic environment. *Journal of experimental biology and agricultural sciences*, v. 10, n. 4, p. 767–772, 2022.

TRAN, G. T. et al. Formation, properties and applications of microalgae-based ZnO nanoparticles: A review. *Journal of environmental chemical engineering*, v. 11, n. 5, p. 110939, 2023.

TRIGO, Eduardo et al. The Bioeconomy and Food Systems Transformation. *Sustainability (Switzerland) MDPI*, , 1 abr. 2023.

TRIPATHI, D. K. et al. An overview on manufactured nanoparticles in plants: uptake, translocation, accumulation and phytotoxicity. *Plant Physiology and Biochemistry*, v. 110, p. 2–12, 2017.

USDA – United States Department of Agriculture. World agricultural production. Washington, D.C.: Foreign Agricultural Service, 2023. Disponível em: <https://www.fas.usda.gov/data/world-agricultural-production>.

VIEIRA FILHO, J. E. R. A produção de soja e sua importância na economia brasileira. Texto para Discussão, Nº 2574. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA, 2024.

WANG, Feng *et al.* Effects of nanoparticles on algae: Adsorption, distribution, ecotoxicity and fate. *Applied sciences* (Basel, Switzerland), v. 9, n. 8, p. 1534, 2019.

WANG, R.; PENG, B.; HUANG, K. The Research Progress Of CO₂ Sequestration Bymicroalgal Bio-Fertilizer In China. *Journal of CO₂ utilization*, v. 11, p. 67–70, 2015.

WIN et al, Theint Theint Et Al. Microalgal Biofertilizers And Plant Growth Stimulants For Sustainable Agriculture. *Industrial biotechnology* (New Rochelle, N.Y.), v. 14, n. 4, p. 203–211, 2018.

WOHLLEBEN, W. et al. Reliable nanomaterial classification of powders using the volume-specific surface area method. *NanoImpact*, v. 9, p. 1–10, 2018.

WUNGMOOL, Piyachat *et al.* Measurement of the cell density of microalgae by an optical method. *Journal of physics. Conference series*, v. 1298, n. 1, p. 012005, 2019.

XU, Li. et al. “Silver Nanoparticles: Synthesis, Medical Applications And Biosafety.” *Theranostics*, V. 10(20), p. 8996-9031, 2020.

YAHAYA, E. et al. CO₂ fed microalgae cultivation in photobioreactor: review on challenges and possible solutions. *Environmental technology reviews*, v. 14, n. 1, p. 540–564, 2025.

YARNOLD, J. et al. Microalgal Aquafeeds As Part Of A Circular Bioeconomy. *Trends in plant science*, v. 24, n. 10, p. 959–970, 2019.

YOUSSEF, S. M. et al. Foliar Spray Or Soil Drench: Microalgae Application Impacts On Soil Microbiology, Morpho-Physiological And Biochemical Responses, Oil And Fatty Acid Profiles Of Chia Plants Under Alkaline Stress. **Biology**, v. 11, n. 12, p. 1844, 2022.

YUAN, B. et al. Intrinsic Insight Of Energy-Efficiency Optimization For CO₂ Capture By Amine-Based Solvent: Effect Of Mass Transfer And Solvent Regeneration. **International journal of greenhouse gas control**, v. 118, n. 103673, p. 103673, 2022.

ZAHOOR, Muhammad et al. A review on silver nanoparticles: Classification, various methods of synthesis, and their potential roles in biomedical applications and water treatment. **Water**, v. 13, n. 16, p. 2216, 2021.

ZAKHAROVA, Olga V. et al. Dose-dependent effects of ZnO nanoparticles towards the microalgae *Lobosphaera*: Compensation of salt stress at low concentration and toxicity at high concentrations. **International journal of molecular sciences**, v. 26, n. 19, p. 9455, 2025.

ZHANG, X. et al. Microalgal Capture Of Carbon Dioxide: A Carbon Sink Or Source? **Bioresource technology**, v. 390, n. 129824, p. 129824, 2023.

ZHUANG, D. et al. Application Progress Of Bioactive Compounds In Microalgae On Pharmaceutical And Cosmetics. **Chemosphere**, v. 291, n. 132932, p. 132932, 2022.

ZIELIŃSKI, Marcin et al. Microalgal Carbon Dioxide (CO₂) Capture and Utilization from the European Union Perspective. **Energies**, v. 16, n. 3, 1 fev. 2023. *Energies*, v. 16, n. 3, 1 fev. 2023.