



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA E AMBIENTAL

ANDRESSA BLASI PAIVA

**BIOINSUMOS PRODUZIDOS COM MICROALGA CULTIVADA EM EFLUENTE
DE BIOPESTICIDAS E BIOFERTILIZANTES E SEUS EFEITOS NA
GERMINAÇÃO E NO DESENVOLVIMENTO INICIAL DO MILHO**

SEROPÉDICA
2026



	UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO INSTITUTO DE TECNOLOGIA PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA E AMBIENTAL	
---	--	---

ANDRESSA BLASI PAIVA

BIOINSUMOS PRODUZIDOS COM MICROALGA CULTIVADA EM EFLUENTE DE
BIOPESTICIDAS E BIOFERTILIZANTES E SEUS EFEITOS NA GERMINAÇÃO E NO
DESENVOLVIMENTO INICIAL DO MILHO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestra em Engenharia Agrícola e Ambiental, Área de concentração: Meio Ambiente.

Orientador(a): Dr. Henrique Vieira de Mendonça.

SEROPÉDICA
2026

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Biblioteca Central/Central de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada
Com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

P142b Paiva, Andressa Blasi, 1998-
Bioinsumos produzidos com microalga cultivada em
efluente de biopesticidas e biofertilizantes e seus
efeitos na germinação e no desenvolvimento inicial do
milho / Andressa Blasi Paiva. - Seropédica, 2026.
88 f.: il.

Orientador: Henrique Vieira de Mendonça.
Dissertação (Mestrado). -- Universidade Federal Rural
do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Agrícola e Ambiental, 2026.

1. Zea mays L.. 2. Bioestimulantes. 3. Tratamento
biológico. 4. Economia circular. 5. reuso de
efluentes. I. Mendonça, Henrique Vieira de, 1984-
orient. II Universidade Federal Rural do Rio de
Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Agrícola e Ambiental III. Título.

É permitida a cópia parcial ou total desta TFC/Dissertação/Tese, desde que seja citada a
fonte

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

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA E
AMBIENTAL

ANDRESSA BLASI PAIVA

BIOINSUMOS PRODUZIDOS COM MICROALGA CULTIVADA EM EFLUENTE DE
BIOPESTICIDAS E BIOFERTILIZANTES E SEUS EFEITOS NA GERMINAÇÃO E NO
DESENVOLVIMENTO INICIAL DO MILHO

Dissertação submetida como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestra no Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental
Área de concentração em Meio Ambiente.

Dissertação aprovada em 23 de fevereiro de 2026.

BANCA EXAMINADORA:



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
SISTEMA INTEGRADO DE PATRIMÔNIO, ADMINISTRAÇÃO E
CONTRATOS

FOLHA DE ASSINATURAS

ATA Nº 95ª ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE ANDRESSA BLASI/2026 - PPGEAAMB
(12.28.01.00.00.00.40)
(Nº do Documento: 436)

(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

(Assinado digitalmente em 25/02/2026 11:18)

CONAN AYADE SALVADOR
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DEPTOENG (12.28.01.00.00.00.44)
Matrícula: ###318#2

(Assinado digitalmente em 25/02/2026 10:47)

HENRIQUE VIEIRA DE MENDONÇA
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DEPTOENG (12.28.01.00.00.00.44)
Matrícula: ###331#3

(Assinado digitalmente em 25/02/2026 11:02)

CÍCERO CÉLIO DE FIGUEIREDO
ASSINANTE EXTERNO
CPF: ###.###.447-##

(Assinado digitalmente em 25/02/2026 11:19)

ANDRESSA BLASI PAIVA
DISCENTE
Matrícula: 2024#####6

Dedico este trabalho à minha família.

Aos meus pais, Valéria e Edilson, e ao meu irmão, Mateus, que me apoiaram incondicionalmente em toda essa jornada.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por todas as bênçãos para chegar até aqui, e por todo amor e proteção nas adversidades.

A todos os meus familiares que me apoiaram e torceram por mim, em especial aos meus pais, Valéria e Edilson, ao meu irmão e melhor amigo, Mateus, e aos meus avós, Maria Eugênia, Wilmar e Dalva.

Ao meu orientador, Prof. Henrique Mendonça, pela orientação, aprendizados e todo o acolhimento desde que entrei no mestrado.

Ao Prof. Conan Salvador, por todas as contribuições, auxílios e conselhos na realização deste trabalho, pela colaboração na minha formação acadêmica e profissional e pela disponibilidade para contribuir também para a defesa da dissertação.

Ao Prof. Cícero Figueiredo, pelo apoio na minha jornada acadêmica desde a graduação e pelas contribuições para a defesa da dissertação.

À Marcela Granato, por toda amizade e apoio. Seu incentivo foi essencial para que eu chegasse até aqui. Pelas orientações e aprendizados no LabMOS e nesta etapa acadêmica, sou grata.

À Mônica Santos, pela grande amizade, companheirismo e ensinamentos desde que cheguei na UFRRJ. Obrigada por dividir a jornada do mestrado comigo, dentro e fora do laboratório. Sou grata pelo acolhimento e parceria, nos dias bons e nos difíceis.

Aos colegas da pós-graduação, Jacob Santana e Fábria Guedes, pelas contribuições e auxílios na realização deste trabalho e pela parceria no dia a dia.

À toda equipe do Grupo de Pesquisa em Microalgas e Interfaces (GPMI) e do Laboratório de Tecnologias Ambientais e Bioenergia (LabTec): Prof. Henrique, Mônica, Jacob, Ângelo, Maria Clara, Yago, Thainá e Nathália, incluindo os parceiros Prof. Conan, Fábria, Thaísa, Gabriel, Leonardo e Giovanna, pelo auxílio e cooperação em todas as etapas do trabalho, além da amizade nesse tempo em que passamos juntos. Agradeço em especial à Mônica, por compartilhar seus conhecimentos, à Maria Clara, pela participação nos experimentos, e ao Ângelo Nascimento, pela parceria nos experimentos, nas pesquisas para os artigos e por encarar esse desafio comigo.

Ao Patrik, por todos os momentos especiais compartilhados, por toda colaboração e apoio durante essa jornada, sou grata.

Às queridas Nathália, e Thainá, por toda colaboração e amizade dentro e fora da UFRRJ.

À empresa AGRIBIO, pela disponibilização da água residuária utilizada no estudo.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental (PGEAAmb) e à Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), pela oportunidade de realização do mestrado acadêmico.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa para a realização do mestrado.

À Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ - processos nº E-26/210.501/2024 e E-26/210.280/2024) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq – processo nº 402494/2023-7) pelo fomento para a realização deste trabalho.

*“Não existe triunfo sem perda, não há vitória
sem sofrimento, não há liberdade sem
sacrifício.” (J. R. R. Tolkien)*

RESUMO

PAIVA, Andressa Blasi. **Bioinsumos produzidos com microalga cultivada em efluente de biopesticidas e biofertilizantes e seus efeitos na germinação e no desenvolvimento inicial do milho.** 2026. 88p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola e Ambiental) - Instituto de Tecnologia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2026.

O crescimento populacional exige da agricultura uma alta produção de alimentos. Consequentemente, haverá um maior uso de fertilizantes e pesticidas para manutenção da produtividade. Atualmente, existem alternativas sustentáveis como os biofertilizantes e biopesticidas. Entretanto, esses produtos também geram efluentes. A biorremediação com microalgas pode ser uma solução para essas águas residuárias, reduzindo poluentes e permitindo a sua reutilização. Dessa forma, o objetivo do estudo foi avaliar, no primeiro capítulo, o tratamento de águas residuárias da indústria de biopesticidas e biofertilizantes (ARBB) com o uso de mix de microalgas, realizando a caracterização físico-química das soluções resultantes e quantificando a presença de fitormônios e a sua influência na germinação de sementes de milho. Quantificou-se as concentrações de poluentes como nitrogênio total (NT), Demanda Química de Oxigênio (DQO) e Fósforo (P) no efluente bruto e após o cultivo de microalgas. Foram preparadas 3 soluções para o teste de germinação: S1 (ARBB + microalgas), sem alteração na composição; S2, solução ARBB + microalgas concentrada por meio da remoção de 50% da fase líquida e S3, contendo apenas a fase líquida removida da S2. A presença de fitormônios foi avaliada nas 3 soluções. O teste de germinação foi realizado em câmara BOD durante 7 dias, comparando-se os tratamentos contendo as soluções S1, S2 e S3, ácido giberélico e o controle (água destilada). O delineamento experimental foi inteiramente casualizado (DIC). No segundo capítulo, objetivou-se a produção de biofertilizante à base de microalgas cultivadas em ARBB, sua caracterização físico-química e a aplicação da biomassa em vasos para avaliar o desenvolvimento inicial do milho. A caracterização analisou os mesmos parâmetros do capítulo 1. Para concentração dos nutrientes, centrifugou-se a biomassa de microalgas. Foram realizados dois cultivos de milho, ambos com duração de 30 dias. Os tratamentos analisados foram: T1 (água – controle), T2 (100% ureia), T3 (80% ureia e 20% biofertilizante), T4 (60% ureia e 40% biofertilizante) e T5 (100% biofertilizante), em DIC. Observou-se boa eficiência de remoção de poluentes após o tratamento com microalgas, principalmente NT e DQO, com eficiências acima de 98%. Os fitormônios detectados nas soluções de microalgas foram Giberelina, Citocinina, Auxina e Ácido abscísico, principalmente em S1 e S2. Não houve interferência dos tratamentos no percentual e na velocidade de germinação. O ácido giberélico apresentou melhor resultado para altura de plântulas. Os

tratamentos com microalgas promoveram maiores valores de altura do que o controle. Para massa fresca e seca da parte aérea das plântulas, os maiores resultados foram obtidos pelo ácido giberélico e pela solução S1. Para comprimento, massa seca e fresca radicular, não houve diferença significativa entre os tratamentos. Observou-se a presença de macronutrientes no biofertilizante produzido com ARBB + microalgas, principalmente NT e P. Nos dois cultivos realizados, não houve diferença estatística entre os tratamentos, para os parâmetros analisados, sendo eles, altura de plantas, diâmetro de colmo, número de folhas, área foliar e massa fresca e seca da parte aérea. O estudo do potencial agronômico desses bioinsumos é relevante, considerando sua atividade como bioestimulante e biofertilizante e a destinação de resíduos da agroindústria.

Palavras-chave: *Zea mays* L.; bioestimulantes; tratamento biológico; economia circular; reuso de efluentes.

ABSTRACT

PAIVA, Andressa Blasi. **Bio-inputs produced with microalgae cultivated in biopesticide and biofertilizer effluent and their effects on maize germination and early development.** 2026. 88p. Dissertation (Master's in Agricultural and Environmental Engineering) – Institute of Technology, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2026.

Population growth demands high food production from agriculture. Consequently, there will be increased use of fertilizers and pesticides to maintain productivity. Currently, there are sustainable alternatives such as biofertilizers and biopesticides. However, these products also generate effluents. Bioremediation using microalgae may be a solution for this wastewater, reducing pollutants and enabling its reuse. Thus, the objective of the study was to evaluate, in the first chapter, the treatment of wastewater from the biopesticide and biofertilizer industry (WBB) using a mix of microalgae, performing the physicochemical characterization of the resulting solutions and quantifying the presence of phytohormones and their influence on maize seed germination. Concentrations of pollutants such as total nitrogen (TN), Chemical Oxygen Demand (COD), and phosphorus (P) were quantified in the raw effluent and after microalgae cultivation. Three solutions were prepared for the germination test: S1 (WBB + microalgae), with no change in composition; S2, an WBB + microalgae solution concentrated by removing 50% of the liquid phase; and S3, containing only the liquid phase removed from S2. The presence of phytohormones was evaluated in the three solutions. The germination test was conducted in a BOD chamber for 7 days, comparing the treatments containing solutions S1, S2, and S3, gibberellic acid, and the control (distilled water). The experimental design was completely randomized (CRD). In the second chapter, the objective was to produce a biofertilizer based on microalgae cultivated in WBB, to characterize its physicochemical properties, and to apply the biomass to pots to evaluate the initial development of maize. The characterization analyzed the same parameters as in Chapter 1. To concentrate the nutrients, the microalgal biomass was centrifuged. Two maize crops were grown, both lasting 30 days. The treatments analyzed were: T1 (water – control), T2 (100% urea), T3 (80% urea and 20% biofertilizer), T4 (60% urea and 40% biofertilizer), and T5 (100% biofertilizer), in CRD. Good pollutant removal efficiency was observed after treatment with microalgae, particularly TN and COD, with efficiencies above 98%. The phytohormones detected in microalgae solutions were gibberellin, cytokinin, auxin, and abscisic acid, mainly in S1 and S2. There was no interference from the treatments on the germination percentage and rate. Gibberellic acid showed the best results for seedling height. Treatments with microalgae resulted in greater height than the control. For fresh and dry mass of the seedling shoot, the best results were obtained with

gibberellic acid and solution S1. For root length, dry mass, and fresh mass, there was no significant difference among the treatments. The presence of macronutrients was observed in the biofertilizer produced with ARBB + microalgae, mainly TN and P. In the two crops studied, there was no statistical difference between the treatments for the analyzed parameters, namely plant height, culm diameter, number of leaves, leaf area, and fresh and dry mass of the aerial parts. The study of the agronomic potential of these bio-inputs is relevant, considering their activity as biostimulants and biofertilizers and the disposal of agro-industrial waste.

Keywords: *Zea mays* L.; biostimulants; biological treatment; circular economy; effluent reuse.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Cultivo de microalgas em água residuária de biopesticidas e biofertilizantes, em ambiente externo com fotobiorreatores de coluna (A e B).....	30
Figura 2. Porcentagem de germinação (a) e IVG (b) de plântulas de milho híbrido cv. AG105 tratadas com pré-embebição em solução contendo água destilada (T0), ácido giberélico (T1) e soluções contendo bioestimulantes de microalgas (T2, T3 e T4).....	39
Figura 3. Desenvolvimento das plântulas de milho híbrido cv. AG1051 aos 7 dias após a germinação para diferentes tipos de pré-embebição: água destilada (T0); ácido giberélico (T1); e, soluções contendo bioestimulantes de microalgas (T2, T3 e T4).....	40
Figura 4. Parâmetros morfológicos das plântulas de milho híbrido cv. AG1051 condicionadas com diferentes tipos de pré-embebição: água destilada (T0); ácido giberélico (T1); e, soluções contendo bioestimulantes de microalgas (T2 – solução S1, T3 – solução S2 e T4 – solução S3). Tratamentos com letras iguais não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 1 % de significância. MFPA: Massa fresca da Parte Aérea; MSPA: Massa Seca da Parte Aérea; MFR: Massa Fresca de Raiz; MSR: Massa Seca de Raiz.....	41
Figura 5. Detalhe do banco de cultivo do mix de microalgas para posterior uso na produção do biofertilizante.....	58
Figura 6. Biofertilizante de microalgas antes e depois da centrifugação para obtenção da biomassa concentrada com retirada de 97,78% da solução sobrenadante.....	59
Figura 7. Croqui da distribuição dos tratamentos analisados de acordo com o delineamento inteiramente casualizado.....	63
Figura 8. Valores mínimos, médios e máximos de temperatura e umidade relativa durante os cultivos 1 (a) e 2 (b).....	66
Figura 9. Estimativa da Evapotranspiração de referência (ET0) diária e acumulada durante os cultivos 1 (a) e 2 (b).....	66
Figura 10. Lâmina total de água aplicada em cada planta de milho durante os 30 dias de experimento dos cultivos 1 (a) e 2 (b).....	67
Figura 11. Parte aérea de plantas de milho com 30 dias após a germinação submetidas aos tratamentos de adubação nitrogenada: T1 (somente água), T2 (100% ureia), T3 (80% ureia e 20% biofertilizante), T4 (60% ureia e 40% biofertilizante) e T5(100% biofertilizante).....	71
Figura 12. Parâmetros morfológicos das plantas de milho do primeiro cultivo com adubação nitrogenada sob diferentes doses de ureia e biofertilizante: T1 (somente água), T2 (100% ureia), T3 (80% ureia e 20% biofertilizante), T4 (60% ureia e 40% biofertilizante) e T5 (100% biofertilizante). DC: Diâmetro de Colmo; AF: Área Foliar; NF: Número de Folhas; MFPA: Massa Fresca da Parte Aérea; MSPA: Massa Seca da Parte Aérea.....	72
Figura 13. Plantas de milho com 30 dias após a germinação sob efeito residual dos tratamentos T1, T2, T3, T4 e T5.....	73
Figura 14. Parâmetros morfológicos das plantas de milho do segundo cultivo. DC: Diâmetro de colmo; AF: Área Foliar; NF: Número de folhas; MFPA: Massa Fresca da Parte Aérea; MSPA: Massa Seca da Parte Aérea.....	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Valores dos parâmetros físico-químicos da água residuária de biopesticidas e biofertilizantes (ARBB) utilizada.....	29
Tabela 2. Valores dos parâmetros físico-químicos dos cultivos com mix de microalgas em água residuária de biopesticidas e biofertilizantes, ao longo de 4 dias de cultivo.....	34
Tabela 3. Caracterização química das soluções S1 (microalga + ARBB), S2 (microalga + ARBB – 50% do volume de água) e S3 (solução aquosa sobrenadante extraída da S2) em comparação com a ARBB bruta.....	35
Tabela 4. Valores de eficiência de biorremediação pelo mix de microalgas verificada na solução S3 (solução aquosa sem a presença da biomassa microalgal).....	36
Tabela 5. Valores médios dos fitormônios detectados nas soluções contendo bioestimulantes S1 (ARBB + microalgas), S2 (ARBB + microalgas concentradas) e S3 (solução aquosa sobrenadante extraída da S2).....	37
Tabela 6. Valores dos parâmetros físico-químicos da água residuária de biopesticidas e biofertilizantes utilizada.....	57
Tabela 7. Umidade gravimétrica residual, fator de correção “F” e densidade do solo utilizado no estudo.....	60
Tabela 8. Valores médios dos atributos físicos do solo.....	60
Tabela 9. Valores médios dos atributos químicos do solo.....	60
Tabela 10. Valores dos parâmetros físico-químicos dos cultivos com mix de microalgas em água residuária de biopesticidas e biofertilizantes.....	67
Tabela 11. Caracterização química do biofertilizante (água residuária de biopesticidas e biofertilizantes + mix de microalgas).....	68
Tabela 12. Concentrações médias de nitrogênio total (NT), nitrogênio amoniacal (NA) e nitrato (NO_3^-) na biomassa concentrada do biofertilizante (água residuária de biopesticidas e biofertilizantes biorremediada + mix de microalgas).....	70

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

[ABA]	[Ácido abscísico]
[AF]	[Área foliar]
[AN]	[Amoniacal nitrogen]
[APHA]	[American Public Health Association]
[ARBB]	[Água Residuária de Biopesticidas e Biofertilizantes]
[BOD]	[Biochemical Oxygen Demand]
[C:N]	[Relação carbono e nitrogênio]
[CE]	[Condutividade elétrica]
[CO ₂]	[Dióxido de carbono]
[COD]	[Chemical Oxygen Demand]
[CONAB]	[Companhia Nacional de Abastecimento]
[COT]	[Carbono Orgânico Total]
[CR]	[Comprimento radicular]
[DAE]	[Dias Após Emergência]
[DAP]	[Dias Após o Plantio]
[DAR]	[Cálculo da dose de biofertilizante]
[DBO ₅]	[Demanda Bioquímica de Oxigênio]
[DC]	[Diâmetro de colmo]
[DIC]	[Delineamento Inteiramente Casualizado]
[DQO]	[Demanda Química de Oxigênio]
[DO]	[Densidade óptica]
[ET ₀]	[Estimativa da evapotranspiração]
[G]	[Porcentagem de germinação]
[HPA]	[Altura da parte aérea]
[IAA]	[Auxina]
[IBGE]	[Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística]
[Inmet]	[Instituto Nacional de Meteorologia]
[IVG]	[Índice de Velocidade de Germinação]
[K ₂ O]	[Óxido de potássio]
[Kc]	[Coeficiente da cultura]
[KCl]	[Cloreto de potássio]
[MAPA]	[Ministério da Agricultura e Pecuária]
[MFPA]	[Massa fresca da parte aérea]
[MFR]	[Massa fresca de raiz]
[MSPA]	[Massa seca da parte aérea]
[MSR]	[Massa seca de raiz]
[MO]	[Matéria orgânica]
[NA]	[Nitrogênio amoniacal]
[N _{abs}]	[Absorção de nitrogênio pela cultura]
[N _{amon}]	[Nitrogênio amoniacal]
[NF]	[Número de folhas]
[N _{nitrato}]	[Nitrogênio nítrico]
[NO ₃ ⁻]	[Nitrato]
[N _{org}]	[Nitrogênio orgânico]
[NT]	[Nitrogênio Total]
[O ₂]	[Oxigênio]
[P ₂ O ₅]	[Pentóxido de fósforo]
[PR]	[Proporção na recuperação de nitrogênio mineral pela cultura]
[PRNT]	[Poder Relativo de Neutralização Total]

[ρ_s]	[Massa específica do solo]
[S]	[Soma de bases]
[S1]	[Solução contendo Água Residuária de Biopesticidas e Biofertilizantes + microalgas]
[S2]	[Solução contendo Água Residuária de Biopesticidas e Biofertilizantes + microalgas concentrada]
[S3]	[Solução sobrenadante de Água Residuária de Biopesticidas e Biofertilizantes + microalgas]
[SO ₄ ⁻²]	[Sulfato]
[ST]	[Super fosfato triplo]
[T]	[Capacidade de troca de cátions]
[T _{m1}]	[Taxa anual de mineralização da matéria orgânica anteriormente existente no solo]
[T _{m2}]	[Taxa de mineralização do nitrogênio orgânico]
[TN]	[Total Nitrogen]
[USDA]	[United States Department of Agriculture]
[V]	[Saturação de bases]
[WBB]	[Wastewater from Biopesticides and Biofertilizers]

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL.....	21
CAPÍTULO I.....	23
2 CAPÍTULO I: Germinação e desenvolvimento de sementes de milho condicionadas com bioestimulante contendo microalgas cultivadas em efluente de biopesticidas e biofertilizantes	24
2.1 Introdução.....	26
2.2 OBJETIVOS	28
2.2.1 Objetivo Geral	28
2.2.2 Objetivos específicos.....	28
2.3 MATERIAL E MÉTODOS	28
2.3.1 Caracterização da Água Residuária de Biopesticidas e Biofertilizantes	28
2.3.2 Produção dos bioestimulantes à base de mix de microalgas.....	30
2.3.3 Caracterização das soluções contendo bioestimulantes	31
2.3.4 Eficiência de remoção do tratamento com mix de microalgas	31
2.3.5 Extração e detecção de fitormônios	31
2.3.6 Teste de germinação das sementes de milho e delineamento experimental	32
2.3.7 Avaliação dos parâmetros morfológicos	33
2.3.8 Análise Estatística.....	33
2.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	33
2.4.1 Caracterização das soluções contendo bioestimulantes	33
2.4.2 Eficiência de remoção do tratamento com mix de microalgas	36
2.4.3 Presença de Fitormônios nas soluções com bioestimulantes	37
2.4.4 Porcentagem de Germinação e Índice de Velocidade de Germinação.....	38
2.4.5 Avaliação dos parâmetros morfológicos de plântulas de milho.....	40
2.5 CONCLUSÃO	43
2.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44
CAPÍTULO II.....	51
3 CAPÍTULO II: Biofertilizante de microalgas cultivadas em efluente de biopesticidas e biofertilizantes e seu efeito no desenvolvimento inicial do milho.....	52
3.1 Introdução.....	54
3.2 OBJETIVO	55
3.2.1 Objetivo geral	55
3.2.2 Objetivos específicos	55
3.3 MATERIAL E MÉTODOS	56
3.3.1 Caracterização da Água Residuária de Biopesticidas e Biofertilizantes	56
3.3.2 Produção do biofertilizante a base de microalgas	57
3.3.3 Caracterização do biofertilizante	59
3.3.4 Caracterização do solo utilizado no cultivo do milho.....	59
3.3.5 Cálculo da dose de biofertilizante	62

3.3.6	Cultivo do milho em fase inicial e delineamento experimental	63
3.3.7	Manejo de irrigação do cultivo de milho	64
3.3.8	Avaliação dos parâmetros morfológicos das plantas de milho	64
3.3.9	Análise estatística.....	65
3.4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	65
3.4.1	Caracterização meteorológica no período de desenvolvimento do milho	65
3.4.2	Caracterização do biofertilizante de microalgas	67
3.4.3	Cálculo da dose do biofertilizante	70
3.4.4	Avaliação dos parâmetros morfológicos	71
3.4.4.1	Cultivo 1	71
4.4.2	Cultivo 2	73
3.5	CONCLUSÃO	76
3.6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77
4	CONCLUSÕES	84
5	RECOMENDAÇÕES DE PESQUISA.....	85
6	REFERÊNCIAS	86

1 INTRODUÇÃO GERAL

A agricultura mundial enfrenta desafios com relação ao crescimento populacional, que demandará uma produção de alimentos cada vez maior. A perspectiva é que a população mundial alcance a marca de 9,7 bilhões de pessoas em 2050 (Organização das Nações Unidas, 2022). Por sua vez, a intensificação da produção de alimentos aumenta a necessidade de uso de fertilizantes minerais, para manter os padrões de produtividade elevados (Manning *et al.*, 2026). Os fertilizantes convencionais, apesar de disponibilizarem os nutrientes necessários às plantas em curto prazo, podem ser facilmente perdidos por lixiviação e volatilização, podendo causar danos ambientais ao solo e à água. (Wang *et al.*, 2021). Além disso, o uso desses fertilizantes por longos períodos pode acidificar o solo (Nsengimana *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2023).

A problemática do uso exacerbado de fertilizantes convencionais soma-se à preocupação com o aumento da atividade da agroindústria, que inclui a produção de alimentos e insumos agrícolas. Consequentemente, há a geração de cada vez mais águas residuárias, que se não forem tratadas corretamente, podem causar danos severos aos cursos d'água (Singh, 2021). A produção de fertilizantes fosfatados e nitrogenados gera efluentes de grande preocupação ambiental, uma vez que esses resíduos possuem altas concentrações de poluentes como fósforo e enxofre, além da presença de nitrogênio amoniacal e alta demanda química de oxigênio (Bhandari, Sorokhaibam e Ranade, 2016; Ray *et al.*, 2023).

Os biofertilizantes surgem como uma solução para a substituição dos fertilizantes convencionais. Entretanto, a produção de biofertilizantes também gera efluentes, uma vez que os microrganismos utilizados necessitam de meios de cultivos ricos em nutrientes (Kumar, Kumar e Mishra, 2025). Outros bioprodutos que enfrentam problema semelhante são os biopesticidas, que são compostos de microrganismos vivos e sua produção também gera efluentes que demandam tratamento adequado (Hamrouni *et al.*, 2025; Pérez-cid *et al.*, 2026). Dessa forma, o tratamento de efluentes é essencial para mitigar danos ambientais causados pela liberação de poluentes nos corpos hídricos, podendo ser feito por meios biológicos (Lakshmikandan *et al.*, 2024). A biorremediação com uso de microalgas é uma alternativa promissora para o tratamento de águas residuárias, promovendo remoção de nutrientes e contaminantes (Gill *et al.*, 2025).

As microalgas são organismos fotossintetizantes que possuem alta capacidade de absorção e conversão de dióxido de carbono (CO₂) em energia e existem diversas aplicações para elas na agroindústria (Ribeiro *et al.*, 2019), incluindo a geração de bioprodutos como biofertilizantes e bioestimulantes (Castro *et al.*, 2024; Ruales *et al.*, 2025). A capacidade de

incrementar e reter nitrogênio no solo demonstra o potencial dos biofertilizantes microalgais para melhoria da fertilidade (Shayesteh *et al.*, 2023). Ademais, esses microrganismos influenciam positivamente a fração biológica do solo, aumentando a abundância de fungos e bactérias responsáveis pela solubilização de nutrientes (Jose *et al.*, 2024). Outro benefício do uso de biofertilizantes microalgais é a diminuição do uso de fertilizantes minerais, que podem degradar a estrutura do solo a longo prazo se manejados incorretamente (Nur *et al.*, 2024). A atividade bioestimulante exercida pelas microalgas é capaz de influenciar positivamente a germinação de sementes e o crescimento das plântulas (Supraja, Behera e Balasubramanian, 2020). Tal efeito é possível devido às concentrações de fitormônios como Auxinas, Citocininas e Giberelinas presentes na biomassa de microalgas (Álvarez-González *et al.*, 2025).

Culturas de elevada importância mundial como o milho (*Zea mays* L.) possuem uma alta demanda por nutrientes (Rotili *et al.*, 2023). Na safra de 2024/25, o Brasil cultivou 22,3 milhões de hectares de milho, com produção de 136 milhões de toneladas do grão (USDA, 2025). Tendo em vista a relevância da produção de milho no Brasil e no mundo, são necessárias estratégias para redução do uso de fertilizantes convencionais. A combinação de fertilizantes orgânicos e inorgânicos é capaz de manter a produtividade do milho, enquanto melhora os níveis de nutrientes e a atividade enzimática no solo (Shao *et al.*, 2025).

Considerando-se o potencial de bioinsumos à base de microalgas de gerarem resultados positivos com relação à disponibilidade de nutrientes e presença de fitormônios, objetivou-se a avaliação do uso de microalgas cultivadas em efluentes da indústria de biopesticidas e biofertilizantes (ARBB) como biofertilizante e bioestimulante na cultura do milho. O estudo foi realizado em dois capítulos. No primeiro capítulo, intitulado “Germinação e desenvolvimento de sementes de milho condicionadas com bioestimulante contendo microalgas cultivadas em efluente de biopesticidas e biofertilizantes”, o objetivo específico foi avaliar o potencial de biorremediação da ARBB pelas microalgas e o uso das microalgas cultivadas como bioestimulante na germinação de sementes de milho. O segundo capítulo, intitulado “Biofertilizante de microalgas cultivadas em efluente de biopesticidas e biofertilizantes e seu efeito no desenvolvimento inicial do milho” teve como objetivo analisar o uso de microalgas cultivadas em ARBB como biofertilizantes para o desenvolvimento inicial do milho.

CAPÍTULO I

GERMINAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DE SEMENTES DE MILHO CONDICIONADAS COM BIOESTIMULANTE CONTENDO MICROALGAS CULTIVADAS EM EFLUENTE DE BIOPESTICIDAS E BIOFERTILIZANTES

2 CAPÍTULO I: Germinação e desenvolvimento de sementes de milho condicionadas com bioestimulante contendo microalgas cultivadas em efluente de biopesticidas e biofertilizantes

RESUMO

As indústrias de fertilizantes e defensivos biológicos geram efluentes com relevante potencial poluidor dos recursos hídricos, exigindo tratamento desses materiais. Dessa forma, o tratamento biológico utilizando microalgas é uma nova alternativa para a biorremediação destas águas residuárias com possibilidade de obtenção de bioinsumos como bioestimulantes, ao término do processo. O presente trabalho avaliou o desempenho de bioestimulantes microalgais produzidos em água residuária de biopesticidas e biofertilizantes (ARBB) na germinação e desenvolvimento inicial de plântulas de milho cv. AG1051. Foram quantificadas as concentrações de poluentes como Nitrogênio Total (NT), Demanda Química de Oxigênio (DQO) e Fósforo (P) no efluente utilizado como meio de cultura para obtenção dos bioestimulantes. Após finalização do cultivo, foram preparadas 3 soluções contendo bioestimulantes: S1, ARBB + microalgas, S2, solução ARBB + microalgas concentrada por meio da remoção de 50% da fase líquida utilizando cloreto férrico, e S3, contendo apenas a fase líquida removida da S2. A presença de fitormônios foi quantificada nas 3 soluções. O teste de germinação foi realizado em câmara BOD, com duração de 7 dias, avaliando-se os tratamentos S1, S2 e S3 em comparação com ácido giberélico e o controle (água destilada). O delineamento foi inteiramente casualizado, com 5 repetições, contendo 80 sementes cada, totalizando 2000 sementes testadas. Os parâmetros analisados foram: percentual de germinação, índice de velocidade de germinação, altura, comprimento radicular e massa seca e fresca de raiz e parte aérea. Observou-se boa eficiência de remoção dos poluentes do efluente bruto após o tratamento com microalgas, alcançando percentuais de 79,75%, 98,29% e 99,18% de P, NT e DQO, respectivamente. Foram detectados fitormônios das classes Giberelina, Citocinina, Auxina e Ácido abscísico nos bioestimulantes S1 e S2. Os resultados do teste germinativo apontaram que não houve interferência na velocidade de germinação nem no percentual de germinação com relação aos tratamentos analisados, uma vez que não houve diferença estatística entre o tratamento controle e os tratamentos com microalgas e com ácido giberélico. O ácido giberélico obteve melhor resultado na altura de plântulas, diferenciando-se estatisticamente dos demais (10,10 cm) seguido pelos bioestimulantes, que alcançaram comprimento de até 8,85 cm e foram estatisticamente superiores em relação ao controle. Nas massas fresca e seca da parte aérea, os

maiores valores foram encontrados nos tratamentos com ácido giberélico (3,35 g de massa fresca e 0,30 g de massa seca) e com o bioestimulante S1 (3,27 g de massa fresca e 0,28 g de massa seca), que se igualaram e diferiram estatisticamente dos demais. Portanto, conclui-se que o tratamento com microalgas foi eficiente para a remoção de poluentes em ARBB. Também se observa que a utilização da ARBB tratada pode gerar benefícios para as plântulas de milho, promovendo crescimento da parte aérea e, conseqüentemente, aumentando a matéria fresca e seca das plantas.

Palavras-chave: tratamento de efluentes; biorremediação; *Zea mays* L.; fitormônios; *Chlorella* sp.

2.1 Introdução

O Brasil possui uma economia com grande participação do setor agropecuário. Em 2025, o setor alcançou um recorde de produção de cereais e leguminosas (Brasil, 2025a). Para permanecer com altos padrões de produtividade é necessária a aplicação de fertilizantes, que fornecem às culturas os nutrientes para o seu crescimento. O país ocupa a quarta posição mundial no consumo de fertilizantes, principalmente para aplicação de nitrogênio, potássio e cálcio (Brasil, 2020). Além desse alto consumo, os fertilizantes utilizados no Brasil são majoritariamente advindos do exterior, demonstrando uma grande dependência internacional. Em 2025, o país alcançou recorde de importação de fertilizantes, com 45,5 milhões de toneladas (Brasil, 2026).

Estudos recentes apontam que o manejo inadequado dos fertilizantes convencionais tem por consequência a contaminação do solo e da água, sejam elas superficiais ou subterrâneas, impactando assim de forma direta a sanidade ambiental (Reda e Hailu, 2017). A forma de manejar os fertilizantes não pode ser obstáculo frente às grandes safras, portanto, são necessários estudos para que a ecologia e a produtividade consigam seguir em equilíbrio. É fundamental que a obtenção dos fertilizantes se torne menos poluente, visto que 38,8% da emissão de gases de efeito estufa provenientes da produção de fertilizantes nitrogenados são advindos da energia fóssil gasta em seu processamento (Menegat, Ledo e Tirado, 2022). A fim de gerar menos impactos ao meio ambiente é essencial que novos produtos de origem biológica sejam produzidos e testados nas plantas, reduzindo assim a pressão sobre a utilização dos fertilizantes convencionais (Dagnaisser *et al.*, 2022; Dagnaisser *et al.*, 2024).

O tratamento com microalgas é uma alternativa viável para a biorremediação de águas residuárias agroindustriais concentradas (Santana *et al.*, 2025). Esses resíduos possuem elevadas concentrações de demanda bioquímica de oxigênio (DBO₅) e demanda química de oxigênio (DQO) (Singh e Pandey, 2021). Os resíduos tratados podem ser utilizados posteriormente como insumos agrícolas (Peres, Braga e Fernandes, 2025). A análise dos parâmetros químicos dos efluentes agroindustriais que serão utilizados como meio de cultivo torna-se importante para evidenciar a eficácia do tratamento biológico proposto, assim como a composição dos bioprodutos produzidos. Tendo isso em vista, a combinação dos resultados vai denotar se o resíduo ainda é nocivo ao meio ambiente (Saleh, Zouari e Al-ghouti, 2020) após o tratamento com as microalgas e quais bioprodutos de valor agrícola serão possíveis de serem produzidos.

A aplicação de bioestimulantes pode proporcionar resposta na capacidade de resiliência da planta, inclusive aumentando o potencial de resistência ao estresse hídrico (Mannino *et al.*, 2020). Além disso, o uso do bioestimulante incrementa não só a disponibilidade de nutrientes, como também a concentração de fitoquímicos e hormônios vegetais importantes para o desenvolvimento da planta (Vinothkumar *et al.*, 2025). A aplicação de bioestimulantes à base de microalgas quando associado à proliferação de bacillus no solo, auxiliam na fixação de nutrientes e crescimento das plantas (Iqbal *et al.*, 2025).

Entretanto, são necessárias novas pesquisas para avaliar a eficiência e a viabilidade econômica do tratamento com bioestimulantes à base de microalgas, sendo hoje esse um caminho vasto para aprofundamento de pesquisas inovadoras. Há indicativos que, além de ser um processo positivo para o meio ambiente, pode trazer benefícios econômicos (Sánchez-Quintero, Fernandes e Beigbeder, 2023). Por outro lado, existem preocupações com relação à eficiência, haja vista o alto consumo de energia e a baixa produção de biomassa, parte crucial do processo de confecção do bioestimulante (Ferreira *et al.*, 2021). O desenvolvimento de novos bioinsumos é de grande relevância, principalmente no Brasil, tendo o país uma área de 83,8 milhões de hectares de área cultivada em 2025, que por sua vez vão gerar alta demanda de insumos agrícolas (Brasil, 2025b).

O milho (*Zea mays* L.) é cultivado de maneira expressiva no território brasileiro. Na safra 2024/25 foram produzidas no Brasil 350,2 mil toneladas de grãos. Desse total, a cultura do milho foi responsável por 139,7 mil toneladas, representando cerca de 40% de toda produção de grãos do país. Em termos de produtividade por unidade federativa, alguns estados se destacam, são eles: Mato Grosso, Paraná, Goiás, Mato Grosso do Sul e Minas Gerais que juntos resultam em 78% da produção de milho nacional (Brasil, 2025b). Segundo o Ministério da Agricultura e Pecuária (Brasil, 2024), o Brasil ocupou em 2022 a segunda posição na exportação mundial do milho, representando 23,4% do total de exportações do produto. As exportações brasileiras de milho correspondem a 8,6% do total de produtos exportados pelo país.

Diante desse cenário, o estudo acerca da produção de bioestimulantes à base de microalgas, cultivados em ARBB é relevante para o desenvolvimento de alternativas sustentáveis, visando o reaproveitamento de resíduos, a economia circular e o saneamento ambiental. É preciso, também, avaliar o potencial desses bioinsumos de gerar resultados positivos em culturas de interesse econômico.

2.2 OBJETIVOS

2.2.1 Objetivo Geral

Avaliar a capacidade bioestimulante de soluções produzidas com microalgas cultivadas em ARBB por meio da análise do percentual e da velocidade de germinação de sementes de milho e de parâmetros morfológicos das plântulas.

2.2.2 Objetivos específicos

Produzir solução com mix de microalgas em ARBB para utilização como bioestimulante em sementes de milho.

Analisar a capacidade de biorremediação da ARBB com o uso de microalgas.

Realizar a caracterização físico-química da solução de microalgas, além de análises da presença de fitormônios.

Avaliar a capacidade bioestimulante da solução em comparação com o uso apenas de água e também de ácido giberélico, a partir da análise do percentual e da velocidade de germinação e de parâmetros morfológicos das plântulas.

2.3 MATERIAL E MÉTODOS

2.3.1 Caracterização da Água Residuária de Biopesticidas e Biofertilizantes

A Água Residuária de Biopesticidas e Biofertilizantes (ARBB) foi cedida pela empresa AGRIBIO, que está presente na Incubadora de Agronegócios da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), localizada na Rodovia BR 465 km 47, Câmpus da UFRRJ, Seropédica, Rio de Janeiro, Brasil. O efluente cedido é resultante dos processos de produção de biofertilizantes, corretivos orgânicos e produtos de controle biológico contendo bactérias e fungos benéficos às plantas.

A caracterização da água residuária foi realizada conforme metodologia do *Standart methods* (APHA, 2017), por meio dos kits de análise da empresa ALFAKIT. Foram analisadas as concentrações de Demanda Química de Oxigênio (DQO), Nitrogênio Total (NT), Nitrogênio Amoniacal (NA), Nitrato (NO_3^-), Fósforo (P), Potássio (K^+), Sulfato (SO_4^{2-}), Alumínio (Al^{+3}), Cálcio (Ca^{+2}) e Magnésio (Mg^{+2}). Também foram analisados os parâmetros de potencial hidrogeniônico (pH), condutividade elétrica (CE), salinidade e temperatura. Todas as análises físico-químicas foram feitas em triplicata e realizadas no Laboratório de Tecnologias Ambientais e Bioenergia (LabTec), localizado no Instituto de Tecnologia da UFRRJ. Para a

leitura das análises químicas utilizou-se um espectrofotômetro (Hach; DR3900). Para leitura do pH, CE, salinidade e temperatura, utilizou-se sensor multiparâmetro digital (ASKO; M4258).

Também foram avaliados os parâmetros de Carbono Orgânico Total (COT), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e Relação C:N. O COT foi calculado a partir da Equação 1 (Bouwer e Chaney, 1974):

$$\text{COT} = 0,25 \times \text{DQO} + 1,3 \quad (1)$$

A relação C:N foi calculada utilizando os valores de COT e NT. Para estimativa da DBO, utilizou-se a Equação 2 (Sperling, 2007):

$$\text{DBO} = f \times \text{DQO} \quad (2)$$

em que:

f: grau de biodegradabilidade do efluente, sendo adotado o valor 0,6 conforme recomendado por Sperling (2007).

Na Tabela 1, observam-se os parâmetros físico-químicos da ARBB utilizada.

Tabela 1. Valores dos parâmetros físico-químicos da água residuária de biopesticidas e biofertilizantes (ARBB) utilizada.

Parâmetro	Média ARBB	DP
Nitrato (mg L ⁻¹)	13,28	± 0,00
Nitrogênio Amoniacal (mg L ⁻¹)	2770,00	± 85,00
Nitrogênio Total (mg L ⁻¹)	2925,00	± 0,00
DQO (mg L ⁻¹)	33700,00	± 0,00
DBO (mg L ⁻¹)	20220,00	± 0,00
COT (mg L ⁻¹)	8426,30	± 0,00
C:N	2,881	-
Fósforo (mg L ⁻¹)	461,00	±1,00
Potássio (mg L ⁻¹)	20,50	± 0,00
Alumínio (mg L ⁻¹)	0,548	± 0,00
Sulfato (mg L ⁻¹)	65,00	± 0,00
Cálcio (mg L ⁻¹)	0,00	± 0,00
Magnésio (mg L ⁻¹)	91,20	± 0,00
pH	6,20	± 0,10
Condutividade elétrica (µS cm ⁻¹)	1890,00	± 10,00
Salinidade (ppm)	950,00	± 0,00

DP: Desvio-padrão.

2.3.2 Produção dos bioestimulantes à base de mix de microalgas

O mix de microalgas utilizado como inóculo contendo as cepas *Chlorella* sp., *Spirogyra* sp. e *Nostoc* sp. foi extraído do banco de cultivo do Labtec. As condições de cultivo do inóculo incluíam a aeração do sistema por meio de compressor de ar com taxa de $2 \text{ L O}_2 \text{ min}^{-1}$ e iluminação artificial utilizando 4 lâmpadas LED de 40 Watts, ambos funcionando 24 h d^{-1} . O cultivo dos bioestimulantes foi realizado em garrafas plásticas transparentes (fotobiorreatores de coluna) com volume total de 5 L e volume útil de 4 L (Figura 1). Utilizou-se uma proporção de 0,670 L de inóculo para 3,33 L de ARBB, conforme Mendonça *et al.* (2022). A homogeneização do sistema foi feita a partir de um compressor de ar com taxa similar a mencionada anteriormente, funcionando 24 h d^{-1} (Mendonça *et al.*, 2022). A iluminação foi fornecida pela luz solar, com fotoperíodo médio de 13 h.

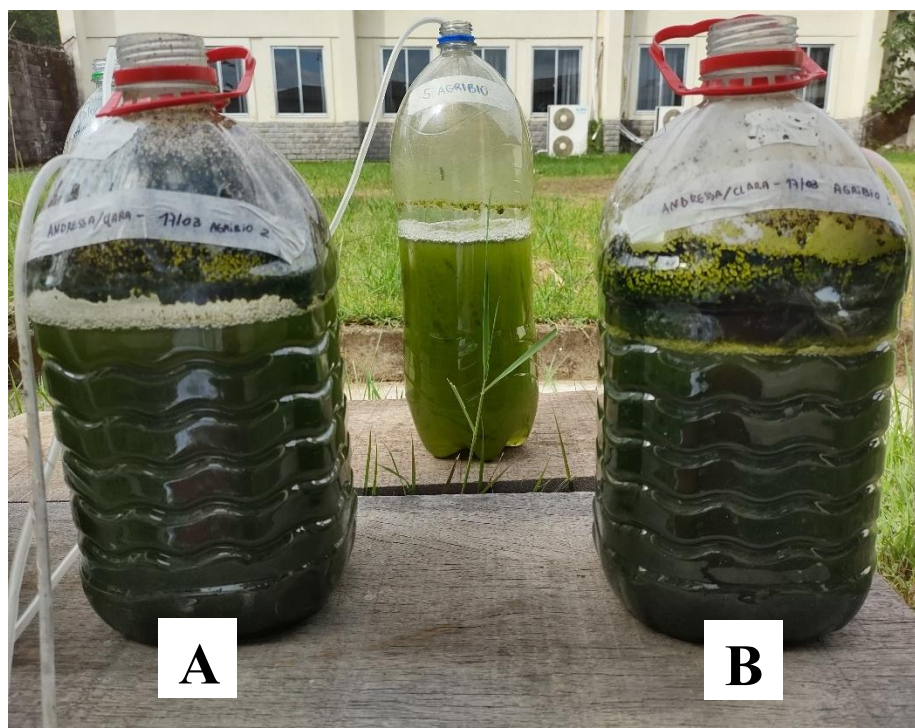


Figura 1. Cultivo de microalgas em água residuária de biopesticidas e biofertilizantes, em ambiente externo com fotobiorreatores de coluna (A e B).

Para monitorar o crescimento das microalgas mediu-se a densidade óptica (DO) a 540 nm em espectrofotômetro (Hach; DR3900) e os parâmetros de pH, CE, salinidade e temperatura por meio de um sensor multiparâmetro digital (ASKO; M4258) duas vezes ao dia, até o cultivo atingir estabilidade (estado estacionário). Considerou-se a estabilização do cultivo a partir da observação do decréscimo dos valores médios da DO diária. A identificação das microalgas presentes nos cultivos foi feita com uso de microscópio óptico (Biofocus; BLUE1600),

utilizando o Atlas de Cianobactérias e Microalgas de Águas Continentais Brasileiras (Sant'Anna *et al.*, 2012).

Três tipos de solução foram utilizadas na pesquisa: S1 (ARBB + microalgas), S2 e S3, que posteriormente foram utilizadas como bioestimulantes. A S2 foi obtida com a retirada de 50% da água do cultivo, com uso de cloreto férrico na dose de 40 mg por litro de solução para decantação da biomassa presente. A S3 foi obtida da água retirada de S2.

2.3.3 Caracterização das soluções contendo bioestimulantes

A caracterização das amostras (S1, S2 e S3) foi realizada seguindo as recomendações do *Standart methods* (APHA, 2017), com cada análise feita em triplicata, utilizando os kits de análise da empresa ALFAKIT. Para leitura das análises químicas utilizou-se um espectrofotômetro (Hach; DR3900). Foram analisadas as concentrações de DQO, NT, NA, NO_3^- , P, K^+ , SO_4^{2-} , Al^{+3} , Ca^{+2} e Mg^{+2} . Os parâmetros de COT, DBO e Relação C:N também foram avaliados, conforme metodologia descrita no item 2.3.1.

2.3.4 Eficiência de remoção do tratamento com mix de microalgas

A eficiência de remoção dos parâmetros químicos foi analisada na solução S3, que continha apenas a fase líquida da ARBB tratada. O cálculo foi feito conforme a Equação 3:

$$Ef = \frac{(Ci - Cf)}{Ci} \times 100 \quad (3)$$

em que:

Ef: eficiência de remoção (%);

Ci: concentração inicial (mg L^{-1});

Cf: concentração final (mg L^{-1}).

2.3.5 Extração e detecção de fitormônios

Foram quantificados os fitormônios de duas fontes: do líquido contendo biomassa de microalgas oriundo de cada fotobiorreator (S1) e do líquido final contido em cada perlon de cultivo (S1, S2 e S3), onde foram germinadas as sementes de milho, descritos posteriormente.

O líquido com biomassa extraído dos fotobiorreatores e do perlon de cultivo, foi homogeneizado por sonificação, posteriormente congelado e liofilizado por 2 dias e posteriormente moído ao estado de pó fino. O perfil de hormônios vegetais foram quantificados por meio de cromatografia líquida de ultra eficiência acoplada a espectrometria de massas em tandem de alto rendimento (UPLC-MS/MS), modelo Acquity H Class, com bomba quaternária

(modelo QSM), injetor automático com controle de temperatura (modelo FTN), forno para colunas e por um espectrômetro de massas com analisador quadrupolo e tempo de voo (modelo Xevo G2-S QToF), em conformidade com as recomendações de Delatorre *et al.* (2017). O método utilizado foi adaptado de Cao *et al.* (2020), habitualmente usado para vegetais e validado para microalgas por Rupawalla *et al.* (2022). Antes de injetar as amostras no UPLC-MS/MS, estas foram purificadas conforme metodologia dos autores supracitados. Foram quantificados os seguintes hormônios: citocinina (DHZ, tZR, DHZR, tZeatin, tZMP, iP, iPA e iPAMP), auxina (IAA), ácido abscísico (ABA) e giberelina (GA1, GA3, GA4, GA20 e GA29). O número de repetição para cada amostra quantificada (S1, S2 e S3) foi de 12 vezes, conforme metodologia de Cao *et al.* (2020).

2.3.6 Teste de germinação das sementes de milho e delineamento experimental

Para o teste de germinação foram utilizadas sementes de milho híbrido (*Zea mays* L.) cultivar AG1051, da empresa AgRoss, Brasil. O experimento foi composto por 2000 sementes, divididas em 5 tratamentos com 5 repetições em Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC), totalizando 25 unidades amostrais. Cada repetição continha 80 indivíduos, somando 400 sementes por tratamento. Os tratamentos analisados foram: T0 (controle – água destilada), T1 (ácido giberélico 40 % – ProGibb 400®), T2 (S1), T3 (S2) e T4 (S3).

Para aplicação dos tratamentos, utilizou-se 0,3 L das soluções, dispostas em 5 béqueres de 1L. As sementes ficaram imersas durante 5h, conforme metodologia adaptada de Mota *et al.* (2025) e logo após foram retiradas para realização do teste germinativo.

O teste de germinação foi realizado conforme metodologia das Regras para Análise de Sementes (Brasil, 2009). Optou-se pelo uso do papel Germitest®, esterilizado em estufa a 130 °C durante 2h. O papel Germitest® utilizado foi umedecido com água destilada equivalente a 2,5 vezes seu peso seco. Cada unidade experimental foi composta por 80 sementes, dispostas em duas folhas do papel Germitest® e cobertas com uma terceira. Para acondicionamento, as unidades foram enroladas e acomodadas em sacos plásticos transparentes. O experimento foi realizado em incubadora BOD com temperatura de 25 °C e fotoperíodo de 12h (Brasil, 2009).

A contagem das plântulas normais germinadas foi feita do 4º ao 7º dia de experimento. Com a contagem do último dia de experimento, calculou-se a porcentagem de germinação (G). O índice de velocidade de germinação (IVG), foi calculado segundo a Equação 4 (Magire, 1962):

$$IVG = \left(\frac{P1}{N1}\right) + \left(\frac{P2}{N2}\right) + \left(\frac{P3}{N3}\right) + \dots + \left(\frac{Pn}{Nn}\right) \quad (4)$$

em que:

IVG: índice de velocidade de germinação;

P1, P2, P3, Pn: número de plântulas contabilizadas nas respectivas contagens;

N1, N2, N3, Nn: número de dias após o início do experimento nas respectivas contagens.

2.3.7 Avaliação dos parâmetros morfológicos

Ao final do experimento (7º dia de contagem) foram selecionadas aleatoriamente 10 plântulas normais de cada unidade amostral (subamostras) para análise dos parâmetros de altura da parte aérea (HPA), comprimento radicular (CR), massa fresca da parte aérea (MFPA) e da raiz (MFR) e massa seca da parte aérea (MSPA) e da raiz (MSR). A medição da HPA e CR foi feita com auxílio de régua graduada em mm. Para obtenção da MSPA e da MSR as subamostras foram colocadas em sacos de papel tipo Kraft e deixadas em estufa com circulação de ar (Ethik; EST.400.TS) a 85°C por 48h para atingirem massa constante (Pereira *et al.*, 2024). A determinação das matérias fresca e seca parte aérea e das raízes foram realizadas em balança analítica (BEL; M214Ai) com precisão de 0,0001 g.

2.3.8 Análise Estatística

Os dados de IVG, G e dos parâmetros morfológicos foram submetidos a análise de variância (ANOVA) utilizando o Software R versão 4.3.3. Para os parâmetros que obtiveram significância, utilizou-se o teste de Scott-Knott a 1% de significância. Os dados foram testados para as pressuposições de homocedasticidade de variâncias (Teste de Bartlett), normalidade dos resíduos (Teste de Shapiro-Wilk) e independência dos resíduos, por meio do *Software* R versão 4.3.3. Para os resultados das análises físico-químicas da ARBB bruta e das soluções S1, S2 e S3, utilizou-se da estatística descritiva, analisando média e desvio-padrão.

2.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.4.1 Caracterização das soluções contendo bioestimulantes

Na Tabela 2, estão dispostas as médias dos parâmetros físico-químicos dos cultivos de mix de microalgas em fotobiorreatores ao longo de 4 dias.

Tabela 2. Valores dos parâmetros físico-químicos dos cultivos com mix de microalgas em água residuária de biopesticidas e biofertilizantes, ao longo de 4 dias de cultivo.

dia	DO	DP	pH	DP	CE ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	DP	Sal (ppm)	DP	°C	DP
1	1,796	$\pm 0,54$	9,10	$\pm 0,39$	1151	$\pm 476,45$	553	$\pm 219,54$	24,4	$\pm 0,70$
2	1,803	$\pm 0,47$	9,10	$\pm 0,12$	1207	$\pm 532,81$	519	$\pm 216,92$	24,2	$\pm 0,76$
3	1,633	$\pm 0,47$	8,90	$\pm 0,31$	1155	$\pm 531,06$	574	$\pm 262,25$	21,1	$\pm 0,10$
4	1,449	$\pm 0,26$	8,90	$\pm 0,33$	1158	$\pm 309,95$	580	$\pm 267,25$	22,6	$\pm 0,21$

DO: Densidade Óptica; CE: Condutividade Elétrica; Sal: Salinidade; °C: Temperatura; DP: Desvio-padrão.

Nos 3º e 4º dias de cultivo foi possível observar o decréscimo da DO, indicando que o cultivo alcançou seu ápice, utilizando os nutrientes presentes na ARBB para seu desenvolvimento. A DO máxima foi alcançada no 2º dia ($1,803 \pm 0,47$). O pH ficou entre $8,9 \pm 0,33$ e $9,1 \pm 0,39$, valor superior com relação ao pH da ARBB (6,1, Tabela 1). Castro *et al.* (2024) também observaram aumento de pH ao fazer a biorremediação com microalgas em água residuária alimentícia. O aumento do pH ocorre naturalmente com a presença de microalgas devido a atividade fotossintética que consome CO_2 e reduz a concentração de íons H^+ no meio (Beltrán-Rocha *et al.*, 2024; Kolachalama e Krishnamoorthy, 2025). Houve decréscimo da CE e da salinidade em comparação com a ARBB não tratada ($1890 \mu\text{S cm}^{-1}$ e 950 ppm, respectivamente, Tabela 1), demonstrando a capacidade do tratamento biológico com microalgas de melhorar a qualidade da água.

No tocante aos valores de CE nota-se valores que podem variar de 623,94 a $1739,81 \mu\text{S cm}^{-1}$, o que de acordo com a classificação de Ayers e Westcot (1991) quanto a restrição ao uso devido a salinidade variam de nenhuma restrição ao uso ($\text{CE} < 700 \mu\text{S cm}^{-1}$) para restrição ligeira a moderada ($700 < \text{CE} < 3000 \mu\text{S cm}^{-1}$). Com isso, a depender do uso continuado em uma produção agrícola e da sensibilidade da cultura produzida, os autores anteriormente citados recomendam que se avalie a necessidade de se aplicar uma lâmina de lixiviação, de modo a controlar a CE da água do solo em um valor abaixo do qual possibilita a produção potencial da cultura. Vale salientar, que os mesmos autores indicam que a tolerância à salinidade da água de irrigação para a cultura do milho visando um rendimento potencial de 100% é de $1100 \mu\text{S cm}^{-1}$, supondo uma lâmina de lixiviação de 15 a 20% no manejo da irrigação. Com isso, verifica-se que os valores médios estão próximos ao exposto pelos autores, e que se considera que o período de experimentação desse trabalho foi curto, diferente do que ocorreria em um cultivo tradicional.

As amostras coletadas das soluções S1 e S3, apresentaram redução na concentração dos parâmetros analisados, quando comparados com a ARBB sem tratamento (Tabela 3). A solução

S2 apresentou maior concentração dos parâmetros, devido a retirada de 50% da água para a sua produção, levando a um acúmulo dos nutrientes presentes na solução.

Tabela 3. Caracterização química das soluções S1 (microalga + ARBB), S2 (microalga + ARBB – 50% do volume de água) e S3 (solução aquosa sobrenadante extraída da S2) em comparação com a ARBB bruta.

Parâmetro	S1	DP	S2	DP	S3	DP	ARBB	DP
NO ₃ ⁻ (mg L ⁻¹)	8,86	± 0,00	17,71	± 0,00	7,53	± 0,00	13,28	± 0,00
NA (mg L ⁻¹)	190,00	± 4,00	380,00	± 8,00	0,00	± 0,00	2770,00	± 85,00
NT (mg L ⁻¹)	255,00	± 0,00	510,00	± 0,00	50,00	± 0,00	2925,00	± 0,00
DQO (mg L ⁻¹)	3460,00	± 0,00	6920,00	± 0,00	275,00	± 0,00	33700,00	± 0,00
DBO (mg L ⁻¹)	2076,00	± 0,00	4152,00	± 0,00	165,00	± 0,00	20220,00	± 0,00
COT (mg L ⁻¹)	866,30	± 0,00	1731,30	± 0,00	70,05	± 0,00	8426,30	± 0,00
C:N	3,397	-	3,395	-	1,401	-	2,881	-
P (mg L ⁻¹)	333,20	± 6,00	420,00	± 3,10	93,30	± 0,30	461,00	± 1,00
K ⁺ (mg L ⁻¹)	8,50	± 0,00	9,20	± 0,00	3,90	± 0,00	20,50	± 0,00
Al ⁺³ (mg L ⁻¹)	0,882	± 0,00	1,763	± 0,00	0,271	± 0,00	0,548	± 0,00
SO ₄ ⁻² (mg L ⁻¹)	55,00	± 0,00	86,70	± 3,00	10,00	± 0,00	65,00	± 0,00
Ca ⁺² (mg L ⁻¹)	48,00	± 0,00	96,00	± 0,00	0,00	± 0,00	0,00	± 0,00
Mg ⁺² (mg L ⁻¹)	9,60	± 0,00	19,20	± 0,00	28,80	± 0,00	91,20	± 0,00

ARBB: Água Residuária de Biopesticidas e Biofertilizantes; DP: Desvio-padrão.

Na ARBB bruta não se observou presença de Ca⁺², entretanto, nas amostras S1 e S2, foram encontradas concentrações de 48 e 96 mg L⁻¹, respectivamente. Tal substância pode ser proveniente do inóculo utilizado na produção do bioestimulante, uma vez que a manutenção dos nutrientes necessários à reprodução do banco de inóculos do LabTec é feita, dentre outros, com uso de efluentes lácteos sintéticos. Em biofertilizante de microalgas cultivadas em efluentes da bovinocultura a concentração de Ca⁺² é de 49 mg L⁻¹ (Dagnaisser *et al.*, 2024)

A quantidade de Mg⁺² encontrada nas soluções S1, S2 e S3 foi de 9,60; 19,20 e 28,80 mg L⁻¹ respectivamente. Valor semelhante ao de S3 foi encontrado por Dagnaisser *et al.* (2024), com 21 mg L⁻¹ de Mg⁺² em biofertilizante de microalgas.

A relação C:N aumentou nas soluções contendo biomassa de microalgas, em comparação com a relação apresentada pela ARBB sem tratamento (2,881). Nas amostras de S1 esse valor foi de 3,397, enquanto no S2, obteve-se 3,395. Já no S3, observou-se diminuição da relação C:N (1,401). O aumento na relação C:N pode ser explicado devido à atividade biorremediadora das microalgas, diminuindo a concentração de N no meio (Santana *et al.*, 2025). De acordo com Mendonça *et al.* (2021), a remoção de nitrogênio em um sistema de tratamento de águas residuárias com microalgas é diretamente dependente do metabolismo do organismo utilizado no tratamento, podendo variar entre cepas distintas. Além disso, observa-se que o tratamento com microalgas é capaz de gerar a biofixação de CO₂ (Santos *et al.*, 2021), contribuindo para o aumento dessa relação nas soluções contendo biomassa microalgal,

diferentemente do que ocorre nas amostras de S3, onde a biomassa foi completamente removida.

2.4.2 Eficiência de remoção do tratamento com mix de microalgas

Na Tabela 4, estão dispostos os valores médios das eficiências de remoção de elementos químicos na amostra da solução S3.

Tabela 4. Valores de eficiência de biorremediação pelo mix de microalgas verificada na solução S3 (solução aquosa sem a presença da biomassa microalgal).

Parâmetro	Ef (%)	DP
NO ₃ ⁻ (mg L ⁻¹)	43,33	± 0,00
NA (mg L ⁻¹)	100,00	± 0,00
NT (mg L ⁻¹)	98,29	± 0,00
DQO (mg L ⁻¹)	99,18	± 0,00
DBO (mg L ⁻¹)	99,18	± 0,00
COT (mg L ⁻¹)	99,17	± 0,00
P (mg L ⁻¹)	79,75	± 0,00
K ⁺ (mg L ⁻¹)	80,98	± 0,00
Al ⁺³ (mg L ⁻¹)	50,52	± 0,00
SO ₄ ⁻² (mg L ⁻¹)	84,62	± 0,00

Ef: Eficiência de remoção; DP: Desvio-padrão.

A maior eficiência de remoção foi a do NA, que alcançou redução de 100% nas amostras da solução S3. A presença de oxigênio (O₂) no meio, advinda da fotossíntese e da injeção de ar do sistema de cultivo, estimula a nitrificação, reduzindo, dessa forma, as concentrações de NA (Mezzari *et al.*, 2013). Em relação ao NO₃⁻, houve redução de 43,33%. Beltrán-Rocha *et al.* (2024) encontraram eficiência de remoção de NO₃⁻ entre 30,9% e 53,6% ao utilizar mix de microalgas contendo *Chlorella* sp. para biorremediação de efluentes municipais secundários. A redução dos níveis de NO₃⁻ não é tão significativa quanto à de NA, uma vez que as microalgas possuem preferência de uso do nitrogênio em forma de NA (Zhang *et al.*, 2023). Para o NT, o percentual foi de 98,29%, o que pode ser explicado pela maior concentração de NA na ARBB bruta. Utilizando cepas de *Chlorella* sp. e *Tetrademus obliquus* no tratamento de águas residuárias de abatedouros avícolas, Viegas, Gouveia e Gonçalves (2021) obtiveram remediação de 100% da carga de NT.

Destaca-se também a remoção da DQO e DBO, ambas alcançando redução de 99,18%. Wang *et al.* (2020) obtiveram redução de 52% da DQO presente em águas residuárias da indústria de biofertilizantes, utilizando tratamento com *Arthrospira platensis* e *Chlorella* sp. Yuan *et al.* (2025) também demonstraram que as microalgas contribuem para a remoção da DQO em efluentes da suinocultura. Em relação ao COT, o tratamento com mix de microalgas

apresentou eficiência de remoção de 99,1%. Valores superiores em relação aos encontrados por Wang *et al.* (2018), no tratamento de efluentes da avicultura.

Para o P, a porcentagem de redução foi de 79,75%. Em estudos utilizando biorremediação com microalgas, alcançou-se eficiência de remoção de 63% de P em efluentes da avicultura (Wang *et al.*, 2020). A remoção de P com o tratamento de microalgas acontece por meio da assimilação microbiana (Ge *et al.*, 2025). A eficiência de remoção de K^+ alcançou percentual de 80,98% em S3. Dagnaisser *et al.* (2024), obtiveram eficiência de remoção de 10,4 % de K^+ em efluentes de bovinocultura tratados com *Arthrospira platensis*, indicando a aptidão do tratamento com mix de microalgas para a redução desse componente. Ainda segundo os autores, o K^+ residual presente na solução após o tratamento permite o reuso da água residuária tratada como fonte de nutrientes para plantas. . Essa afirmação também se aplica ao presente estudo, especialmente para os teores de NT, P, Ca^{+2} , Mg^{+2} , SO_4^{-2} , e K^+ nas soluções S1 e S2.

Observou-se que a remoção de SO_4^{-2} foi de 84,62%. A concentração desse ânion após certo tempo de tratamento torna-se constante devido à competição de outros elementos essenciais pelos mesmos sítios de absorção do SO_4^{-2} (Mohammadi *et al.*, 2018). Em relação ao Al^{+3} , houve eficiência de remoção de 50,55%.

2.4.3 Presença de Fitormônios nas soluções com bioestimulantes

A partir dos resultados da presença de fitormônios nos compostos S1, S2 e S3 (Tabela 5), é possível observar que as maiores concentrações de fitormônios encontram-se em S2, seguido pelo S1 e no S3, respectivamente. Dos 14 fitormônios avaliados, detectou-se a presença de apenas quatro na amostra S3.

Tabela 5. Valores médios dos fitormônios detectados nas soluções contendo bioestimulantes S1 (ARBB + microalgas), S2 (ARBB + microalgas concentradas) e S3 (solução aquosa sobrenadante extraída da S2).

Fitormônio (ng/g)	S1	DP	S2	DP	S3	DP
Giberelina						
GA1	0,310	± 0,017	0,450	± 0,006	0,100	± 0,00
GA3	0,120	± 0,015	0,230	± 0,015	ND	-
GA4	0,250	± 0,00	0,420	± 0,006	ND	-
GA20	1,93	± 0,115	2,87	± 0,231	ND	-
GA29	2,93	± 0,115	4,87	± 0,321	0,500	± 0,00
Citocinina						
DHZR	ND	-	ND	-	ND	-
DHZ	0,970	± 0,06	2,07	± 0,115	ND	-
tZR	ND	-	ND	-	ND	-
T-Zeatin	ND	-	ND	-	ND	-
iP	31,00	± 1,00	40,33	± 0,577	ND	-
IPA	1,70	± 0,520	3,03	± 0,577	ND	-
iPAMP	14,00	± 1,00	21,67	± 1,53	0,300	± 0,20

Auxina	50,30	$\pm 0,577$	82,30	$\pm 2,52$	0,300	$\pm 0,06$
Ácido abscísico	1,70	$\pm 0,265$	3,03	$\pm 0,577$	ND	-

ng g⁻¹: nanogramas por grama; ARBB: Água Residuária de Biopesticidas e Biofertilizantes; DP: Desvio-padrão; ND: Não Detectado.

O composto S1 apresentou Giberelinas GA1, GA3, GA4, GA20 e GA29, com concentrações entre $0,120 \pm 0,015$ e $2,93 \pm 0,115$ ng g⁻¹. Em relação às Citocininas, encontrou-se DHZ, iP, IPA e iPAMP em concentrações de $0,97 \pm 0,06$; $31,00 \pm 1,00$; $1,70 \pm 0,520$ e $14,00 \pm 1,00$ ng g⁻¹, respectivamente. Também se observou a presença de Auxina ($50,30 \pm 0,577$ ng g⁻¹) e de Ácido abscísico ($1,70 \pm 0,265$ ng g⁻¹). As concentrações das Giberelinas em S2 ficaram entre $0,230 \pm 0,015$ e $4,87 \pm 0,321$ ng g⁻¹. Para as Citocininas, esses valores foram de $2,07 \pm 0,115$ ng g⁻¹ (DHZ), $40,33 \pm 0,577$ ng g⁻¹ (iP), $3,03 \pm 0,577$ ng g⁻¹ (IPA) e $21,67 \pm 1,53$ ng g⁻¹ (iPAMP). Para Auxina e Ácido abscísico, as concentrações encontradas foram de $82,30 \pm 2,52$ ng g⁻¹ e $3,03 \pm 0,577$ ng g⁻¹, respectivamente. A presença de moléculas com alta atividade bioestimulante, como as auxinas, indica potencial desses compostos para aplicação agrícola (Chabili *et al.*, 2025).

Os fitormônios detectados em S3 foram Giberelinas GA1 ($0,100 \pm 0,00$ ng g⁻¹) e GA29 ($0,500 \pm 0,00$ ng g⁻¹), Citocinina iPAMP ($0,300 \pm 0,20$ ng g⁻¹) e Auxina ($0,300 \pm 0,06$ ng g⁻¹), indicando que os demais fitormônios permaneceram retidos na biomassa de microalgas produzida no processo de biorremediação da ARBB.

Ao analisarem a presença de fitormônios em microalgas do gênero *Chlorella* sp., Rupawalla *et al.* (2022) encontraram Giberelinas GA1, GA4, GA20 e GA29. As Citocininas detectadas pelos autores foram t-ZEATIN, DHZR, iP, IPA e iPAMP, com concentrações entre 0,35 e 805 ng g⁻¹. Já para Auxina, o estudo obteve 216 ng g⁻¹. Foi detectada também a presença de Ácido abscísico, porém não em concentração suficiente para quantificação.

Em microalgas da espécie *Spirulina platensis* observou-se a presença de Auxina, Ácido abscísico e Giberelinas GA1 e GA4. O cultivo dessas microalgas em diferentes meios de cultura, incluindo efluentes lácteos, influência nas concentrações dos fitormônios Auxina e Ácido abscísico presentes na biomassa microalgal (Zapata *et al.*, 2021). As condições de cultivo das microalgas também influenciam a concentração de fitormônios em seus extratos, principalmente com a ocorrência de estresses abióticos com relação à presença adequada de nutrientes, suprimento de CO₂, luminosidade e baixas temperatura (Rupawalla *et al.* 2022).

2.4.4 Porcentagem de Germinação e Índice de Velocidade de Germinação

Para a porcentagem de germinação (Figura 2a) e IVG (Figura 2b), os tratamentos não apresentaram diferença estatística entre si segundo o teste F a 1% de significância. A

germinação alcançou percentual máximo de 84,25% (T1) e mínimo de 78,75% (T2). Dentre os tratamentos com bioestimulantes, o T4 obteve maior percentual (81,03%). Carmo *et al.* (2021) apresentaram resultados semelhantes de germinação com uso de bioestimulantes em sementes de milho em condições ideais de disponibilidade de água. Em estresse hídrico, entretanto, os autores obtiveram valores superiores com uso de bioestimulantes. A ausência de efeito no presente estudo se deve à escolha da semente de uma cultivar com alta taxa de germinação.

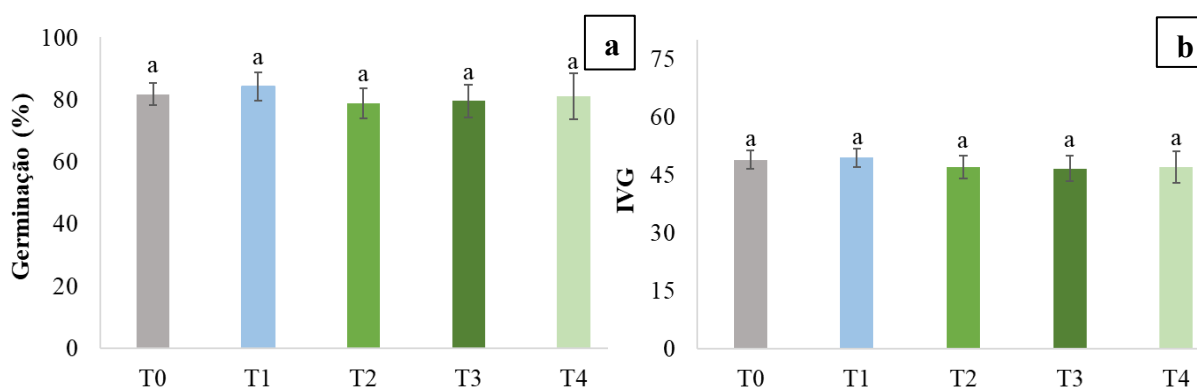


Figura 2. Porcentagem de germinação (a) e IVG (b) de plântulas de milho híbrido cv. AG105 tratadas com pré-embebição em solução contendo água destilada (T0), ácido giberélico (T1) e soluções contendo bioestimulantes de microalgas (T2, T3 e T4).

Estudos utilizando bioestimulantes à base de microalgas encontraram influência positiva na germinação de sementes de trigo, com aumento de 147%. A aplicação com menor concentração foi a que apresentou melhor efeito na germinação, devido a fatores inibitórios com uso de concentrações mais altas de bioestimulantes (Viegas, Gouveia e Gonçalves, 2021), fato observado também no presente estudo.

Em bioestimulantes com concentrações suficientes de fitormônios como Citocininas (iPA, iP e iPAMP) e Giberelinas (GA 20 e GA 29) é possível gerar aumento da taxa de germinação, devido a participação relevante dessas substâncias no estímulo da germinação e no alongamento celular (Rupawalla *et al.*, 2022).

Com relação ao IVG, obteve-se valores entre $49,41 \pm 2,30$ (T1) e $46,58 \pm 3,29$ (T3). Observou-se que a aplicação das soluções contendo microalgas não proporcionou aumento da velocidade de germinação do milho, bem como a aplicação do ácido giberélico. Resultado similar foi obtido por Costa *et al.* (2024), utilizando tratamento com bioestimulante organomineral em sementes de milho, onde não houve diferença significativa entre o IVG dos tratamentos analisados e da testemunha.

2.4.5 Avaliação dos parâmetros morfológicos de plântulas de milho

Os parâmetros morfológicos analisados foram HPA e CR (Figura 3), além de MFPA, MSPA, MFR e MSR. Com relação à HPA (Figura 4a), o tratamento com ácido giberélico (T1) diferiu estatisticamente dos demais e obteve o melhor desempenho, com $10,10 \pm 0,89$ cm de comprimento, seguido pelos tratamentos com uso de microalgas ou sobrenadante (T2, T3 e T4), que apresentaram valores entre $8,06 \pm 0,78$ cm e $8,95 \pm 1,29$ cm e diferiram do controle (T0). O controle apresentou resultado inferior aos demais ($6,56 \pm 0,35$ cm). Observa-se que apesar de não alcançarem o desempenho do ácido giberélico, os bioestimulantes foram capazes de gerar resultados positivos com relação à altura das plântulas, quando comparados com o tratamento controle.

Buchelt *et al.* (2019) alcançaram impactos positivos com uso de ácido giberélico no desenvolvimento inicial da cultura do milho cv. LG 6033 VTPro2, nos parâmetros de comprimento e massa seca da parte aérea. Supraja, Behera e Balasubramanian (2020) observaram diferentes concentrações de extratos de microalgas em plântulas de tomate, obtendo o melhor resultado de altura da parte aérea com uma concentração de 40% de mix de microalgas contendo *Chlorella* sp., *Scenedesmus* sp., *Spirulina* sp. e *Synechocystis* sp.



Figura 3. Desenvolvimento das plântulas de milho híbrido cv. AG1051 aos 7 dias após a germinação para diferentes tipos de pré-embebição: água destilada (T0); ácido giberélico (T1); e, soluções contendo bioestimulantes de microalgas (T2, T3 e T4).

Para CR, MFR e MSR não houve diferença estatística entre os tratamentos analisados. No CR, foram observados valores entre $10,97 \pm 0,77$ cm e $12,56 \pm 1,42$ cm (Figura 4b). Para MFR (Figura 4e), as amostras obtiveram entre $4,83 \pm 0,34$ g e $5,34 \pm 0,18$ g, enquanto para MSR (Figura 4f), os dados ficaram entre $2,22 \pm 0,21$ g e $2,37 \pm 0,07$ g. Estudo de Ferreira *et al.* (2024a) encontrou melhores induções de enraizamento com uso da porção sobrenadante de bioestimulantes de microalgas em plântulas de pepino, em comparação com a aplicação de biomassa de microalgas. Por outro lado, um aumento de 25% no CR de *Arabidopsis thaliana* foi obtido por Chovancek *et al.* (2025), utilizando biomassa de *Chlorella sorokiniana*.

Os tratamentos T1 e T2 foram os que apresentaram resultados mais positivos para MFPA (Figura 4c), com $3,35 \pm 0,20$ g e $3,27 \pm 0,36$ g, respectivamente. Esses valores diferiram estatisticamente dos demais. Os tratamentos T3 e T4 obtiveram massa de $3,03 \pm 0,07$ g e $2,94 \pm 0,26$ g, igualando-se entre si e apresentando resultado superior ao do tratamento controle ($2,26 \pm 0,17$ g). Em plântulas de alface, Alvarez-González *et al.* (2025) obtiveram resultado significativamente superior de peso fresco foliar com aplicação de bioestimulantes contendo *Scenedesmus* sp.

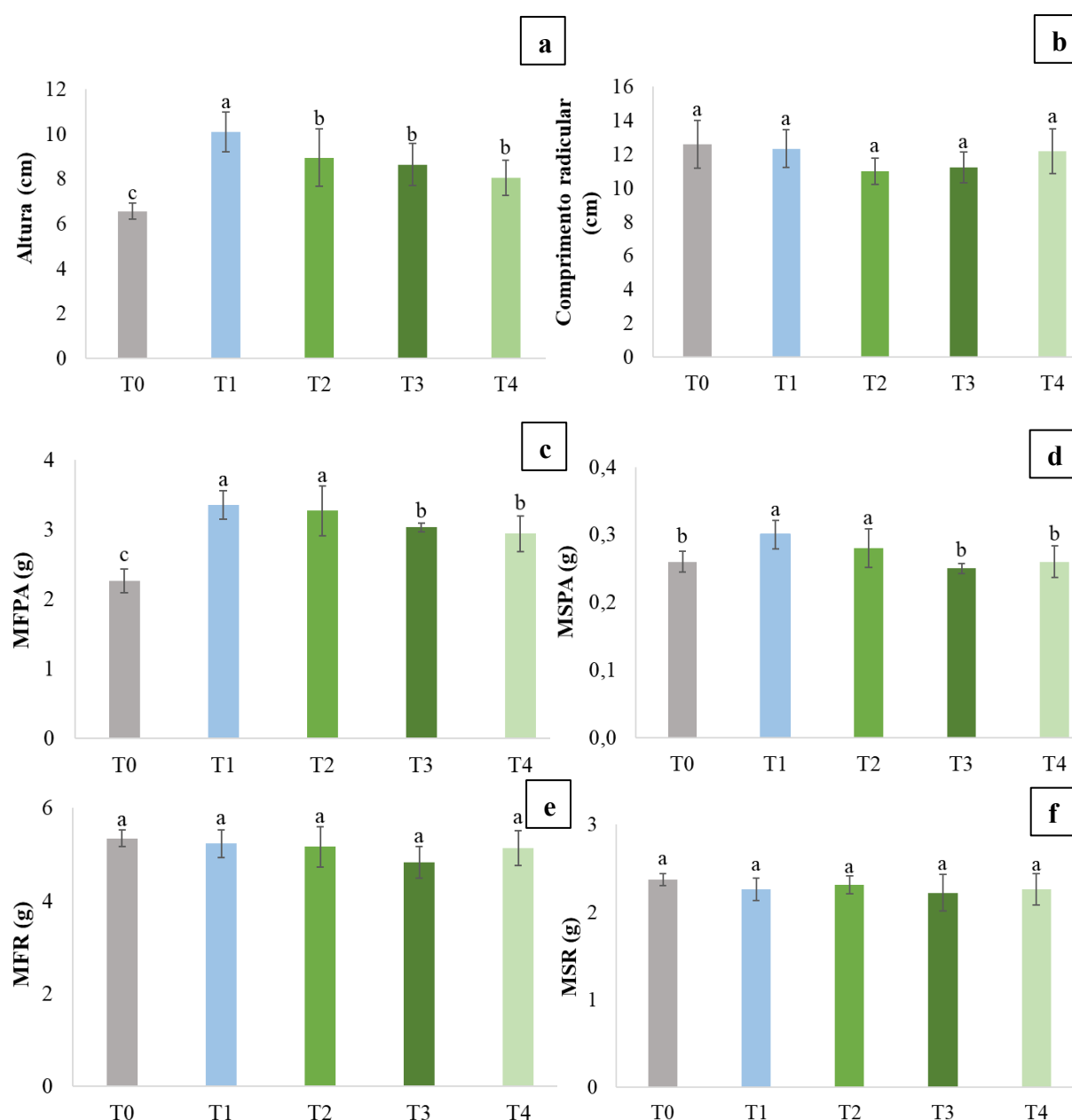


Figura 4. Parâmetros morfológicos das plântulas de milho híbrido cv. AG1051 condicionadas com diferentes tipos de pré-embebição: água destilada (T0); ácido giberélico (T1); e, soluções contendo bioestimulantes de microalgas (T2 – solução S1, T3 – solução S2 e T4 – solução S3). Tratamentos com letras iguais não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 1 % de significância. MFPA: Massa fresca da Parte Aérea; MSPA: Massa Seca da Parte Aérea; MFR:

Massa Fresca de Raiz; MSR: Massa Seca de Raiz.

A respeito da MSPA (Figura 4d), no tratamento T2 verificou-se resultado positivo estatisticamente similar ao obtido pelo T1, com respectivos valores de $0,28 \pm 0,03$ g e $0,3 \pm 0,02$ g, que diferiram de T0, T3 e T4. Os demais tratamentos com microalgas apresentaram massas entre $0,25 \pm 0,01$ g e $0,26 \pm 0,02$ g e não apresentaram diferença estatística com relação ao controle ($0,26 \pm 0,02$ g). Em estudo com plântulas de manjerição, Ferreira *et al.* (2024b) obtiveram incremento de 37% na MSPA ao utilizarem tratamentos condicionados com solução bioestimulante de *C. vulgaris*. Os autores encontraram também aumento de 11% na MSR, em comparação com o tratamento controle. Compostos com biomassa de microalgas são fontes naturais de bioestimulantes, com potencial para induzir o crescimento vegetal (Mazepa *et al.*, 2021). Utilizando dose de 200 mL ha^{-1} de bioestimulante contendo extrato de algas do gênero *Ascophyllum*, Souza Netta *et al.* (2022) observaram incremento na área e no comprimento foliar, massa fresca radicular e no comprimento radicular de plântulas de milho em desenvolvimento inicial.

2.5 CONCLUSÃO

O mix de microalgas cultivado na presente pesquisa foi eficiente para remoção de componentes químicos presentes em ARBB. As soluções resultantes da biorremediação, analisadas com e sem a presença da biomassa das microalgas possuem concentrações de fitormônios das classes Giberelina, Citocinina, Auxina e Ácido abscísico. Contudo, as amostras oriundas do condicionamento de pré-embebição com soluções de microalgas, bem como o ácido giberélico, não interferiram na porcentagem de germinação e no IVG das plântulas de milho, uma vez que não houve diferença estatística entre os tratamentos e o controle (água destilada). Com relação aos parâmetros morfológicos do desenvolvimento inicial das plântulas de milho, o comprimento radicular, a massa fresca e seca radicular, para os tratamentos contendo microalgas e ácido giberélico não obtiveram diferença estatística em relação ao controle. No entanto, para altura da parte aérea, o ácido giberélico obteve o melhor resultado, apresentando diferença estatística em relação aos demais, seguido pelos tratamentos com microalgas, que apresentaram resultado estatisticamente superior ao controle. Tratando-se da massa fresca e seca da parte aérea, os maiores valores foram obtidos no tratamento com uso do ácido giberélico e com o uso da solução bioestimulante S1 (ARBB + microalgas), que diferiram estatisticamente dos demais. De forma geral, o presente estudo contribui para análise do potencial dos bioestimulantes de microalgas em gerar benefícios em culturas de relevância econômica, em relação ao desenvolvimento das plântulas. O uso de compostos advindos do tratamento biológico de efluentes contribui para a destinação de resíduos e promove a economia circular. Adicionalmente, destaca-se que são necessários mais estudos para avaliação das concentrações benéficas dos bioestimulantes microalgais, bem como de sua viabilidade econômica em grande escala.

2.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, A. et al. Exploring the biostimulant potential of *Scenedesmus* sp. grown in wastewater: impacts on plant growth and photosynthetic activity of lettuce. **Chemosphere**, v. 382, p. 144494, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2025.144494>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653525004382?via%3Dihub>. Acesso em: 02 jan. 2026.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 23a ed. Washington, DC: American Public Health Association, 2017. ISBN: 978-0875532875.

AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W.; tradução de H. R. Gheyi, J. F. de Medeiros, F. A. V. Damasceno. *A qualidade da água na agricultura*. Campina Grande: UFPb, 1991. 218p. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 29 Revisado 1).

BELTRÁN-ROCHA, J. C. et al. Effect of natural increase of pH and microalgae cyclical re-cultivation on biomass production and polishing of municipal secondary effluent. **Desalination and Water Treatment**, v. 317, p. 100103, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100103>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1944398624001243?via%3Dihub>. Acesso em: 02 jan. 2026.

BOUWER, H.; CHANEY, R. L. Land treatment of wastewater. **Advances in agronomy**, v. 26, p. 133-176, 1974. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60870-6](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60870-6). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/chapter/bookseries/abs/pii/S0065211308608706>. Acesso em: 02 jan. 2026.

BRASIL. *Estudos Estratégicos: Fertilizantes (v. 10)*. Brasília: Governo do Brasil / Secretaria de Assuntos Estratégicos da Presidência da República, 2020. Disponível em: https://www.gov.br/planalto/pt-br/assuntos/assuntos-estrategicos/documentos/estudos-estrategicos/sae_publicacao_fertilizantes_v10.pdf. Acesso em: 06 out. 2025.

BRASIL. Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB). *Acompanhamento da safra brasileira de grãos: v. 12, safra 2024/25, n. 12, décimo segundo levantamento*. Brasília, DF: Conab, set. 2025b. 133 p. ISSN 2318-6852. Disponível em: https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/safra-de-graos/boletim-da-safra-de-graos/12o-levantamento-safra-2024-25/e-book_boletim-de-safras-12o-levantamento_2025.pdf. Acesso em: 02 jan. 2026.

BRASIL. Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB). Boletim Logístico ANO IX – janeiro/2026. Brasília, DF: Conab, jan. 2026. 29 p. Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/logistica/boletim-logistico/boletim-logistico-janeiro-2026.pdf/@download/file>. Acesso em: 18 mar. 2026.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). *EPAG: Estatísticas do Produto Agrícola e Pecuário – ed. ago. 2025*. Rio de Janeiro, RJ: IBGE, 2025a. Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/2415/epag_2025_ago.pdf. Acesso em: 23 set. 2025.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA). *Exportações Brasileiras: Milho*.

Brasília: MAPA, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/relacoes-internacionais/documentos/Milho.pdf>. Acesso em: 15 set. 2025.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). *Regras para análise de sementes*. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. – Brasília: Mapa/ACS, 2009. 399 p. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/arquivos-publicacoes-insumos/2946_regras_analise_sementes.pdf. Acesso em: 02 jan. 2026.

BUCHOLT, A. C. et al. Aplicação de bioestimulantes e *Bacillus subtilis* na germinação e desenvolvimento inicial da cultura do milho. **Revista de Agricultura Neotropical**, v. 6, n. 4, p. 69-74, 2019. DOI: <https://doi.org/10.32404/rean.v6i4.2762>. Disponível em: <https://periodicosonline.uems.br/agrineo/article/view/2762>. Acesso em: 02 jan. 2026.

CAO, D. et al. A rapid method for quantifying RNA and phytohormones from a small amount of plant tissue. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, p. 605069, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.605069>. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2020.605069/full>. Acesso em: 02 jan. 2026.

CARMO, M. A. P. et al. Bioestimulantes aplicados em sementes e plantas de milho doces sob condições de estresse abiótico. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v.7, n.3, p.31727-31741, 2021. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv7n3-747>. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/27225>. Acesso em: 02 jan. 2026.

CASTRO, I. M. P. et al. The effects of microalgae use as a biofertilizer on soil and plant before and after its anaerobic (co-) digestion with food waste. **Science of The Total Environment**, v. 934, p. 173301, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173301>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S004896972403448X?via%3Dihub>. Acesso em: 02 jan. 2026.

CHABILI, A. et al. Germination screen of eco-extracts from soil cyanobacteria and microalgae for their biostimulant effects on wheat seeds emergence and vigor. **Algal Research**, p. 104087, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2025.104087>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211926425001961?via%3Dihub>. Acesso em: 16 jan. 2026.

CHOVANCEK, E. et al. Stepwise processing of *Chlorella sorokiniana* confers plant biostimulant that reduces mineral fertilizer requirements. **Bioresource Technology**, v. 418, p. 131923, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.131923>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852424016274?via%3Dihub>. Acesso em: 02 jan. 2026.

COSTA, M. P. S. et al. Germinação e vigor na cultura do milho sob tratamento com bioestimulante para sementes. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v. 7, n. 3, p. e71857-e71857, 2024. DOI: <https://doi.org/10.34188/bjaerv7n3-046>. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BJAER/article/view/71857>. Acesso em: 02 jan. 2026.

DAGNAISSER, L. S. et al. Microalgae as Bio-fertilizer: a New Strategy for Advancing Modern Agriculture, Wastewater Bioremediation, and Atmospheric Carbon Mitigation. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 233, p. 477-23, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11270-022-05917-x>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11270-022-05917-x>. Acesso em: 02 jan. 2026.

DAGNAISSER, L. S. et al. Microalgae cultivated in cattle wastewater as a biofertilizer: tests on the production of arugula (*Eruca Vesicaria*) and the benefits for sustainable agriculture. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 235, n. 11, p. 740, 2024. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11270-024-07519-1>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11270-024-07519-1>. Acesso em: 02 jan. 2026.

DELATORRE, C. et al. Hormonal profiling: development of a simple method to extract and quantify phytohormones in complex matrices by UHPLC–MS/MS. **Journal of Chromatography B**, v. 1040, p. 239-249, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jchromb.2016.11.007>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1570023216311989?via%3Dihub>. Acesso em: 02 jan. 2026.

FERREIRA, A. et al. Bioprocess to produce biostimulants/biofertilizers based on microalgae grown using piggery wastewater as nutrient source. **Bioresource Technology**, v. 414, p. 131619, 2024a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.131619>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852424013233?via%3Dihub>. Acesso em: 02 jan. 2026.

FERREIRA, A. et al. Biostimulant and biopesticide potential of microalgae growing in piggery wastewater. **Environmental Advances**, v. 4, p. 100062, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2021.100062>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666765721000338?via%3Dihub>. Acesso em: 02 jan. 2026.

FERREIRA, E. S. et al. Potentiating *Chlorella vulgaris* bioinput as a growth biostimulant in the production of basil seedlings with the addition of vitamin B3. **Algal Research**, v. 83, p. 103706, 2024b. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2024.103706>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2211926424003187?via%3Dihub>. Acesso em: 02. jan. 2026.

GE, S. H. et al. Attached microalgae-simulated plants enhanced multiple-pollutant removal in a tidal flow constructed wetland: quantified efficiencies, pathways, and biological mechanisms. **Water Research**, p. 124654, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2025.124654>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004313542501557X?via%3Dihub>. Acesso em: 16 jan. 2026.

IQBAL, Y. et al. Innovative phytomanagement systems by combining miscanthus and switchgrass with biostimulants to enhance microbial diversity and soil remediation. **Industrial Crops and Products**, v. 234, p. 121610, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.121610>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926669025011562?via%3Dihub>. Acesso em: 02 jan. 2026.

KOLACHALAMA, D.; KRISHNAMOORTHY, S. Harnessing microalgae for biodesalination and CO₂ sequestration toward integrated water-carbon solutions. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, p. 120214, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.120214>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213343725049115?via%3Dihub>. Acesso em: 09 mar. 2026.

MAGUIRE, J. D. Speed of germination-aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigor. 1962. DOI:

<https://doi.org/10.2135/cropsci1962.0011183X000200020033x>. Disponível em:

<https://acess.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2135/cropsci1962.0011183X000200020033x>. Acesso em: 02 jan. 2026.

MANNINO, G. et al. Effects of different microbial inocula on tomato tolerance to water deficit. **Agronomy**, v. 10, n. 2, p. 170, 2020. DOI:

<https://doi.org/10.3390/agronomy10020170>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4395/10/2/170>. Acesso em: 02 jan. 2026.

MAZEPA, E. et al. Plant growth biostimulant activity of the green microalga *Desmodesmus subspicatus*. **Algal Research**, v. 59, p. 102434, 2021. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102434>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211926421002538?via%3Dihub>. Acesso em: 16 jna. 2026.

MENDONÇA, H. V. et al. Biofuel recovery from microalgae biomass grown in dairy wastewater treated with activated sludge: The next step in sustainable production. **Science of The Total Environment**, v. 824, p. 153838, 2022. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153838>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969722009305>. Acesso em: 02 jan. 2026.

MENDONÇA, H. V. et al. Microalgae in a global world: New solutions for old problems?, **Renewable Energy**, Volume 165, Part 1, 2021, Pages 842-862, ISSN 0960-1481. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.11.014>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148120317456?via%3Dihub>. Acesso em: 10 mar. 2026.

MENEGAT, S.; LEDO, A.; TIRADO, R. Greenhouse gas emissions from global production and use of nitrogen synthetic fertilisers in agriculture. **Scientific Reports**, v. 12, n. 1, p. 14490, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-18773-w>. Disponível em:

<https://www.nature.com/articles/s41598-022-18773-w>. Acesso em: 02 jan. 2026.

MEZZARI, M. P. et al. Assessment of N₂O emission from a photobioreactor treating ammonia-rich swine wastewater digestate. **Bioresource technology**, v. 149, p. 327-332, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.09.065>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852413014971>. Acesso em: 16 jan. 2026.

MOHAMMADI, M. et al. Cultivation of microalgae in a power plant wastewater for sulfate removal and biomass production: A batch study. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 6, n. 2, p. 2812-2820, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.04.037>.

Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2213343718302197?via%3Dihub>.

Acesso em: 02 jan. 2026.

MOTA, V. L. N. et al. Avaliação da germinação das sementes de milho SHS 7939 pro 3 com diferentes tipos de água. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v. 8, n. 1, p. e77903-e77903, 2025. DOI: <https://doi.org/10.34188/bjaerv8n1-107>. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BJAER/article/view/77903>. Acesso em: 02 jan. 2026.

PEREIRA, B. T. V. et al. Crescimento inicial do milho em resposta a aplicação de enraizadores. **Trends in Agricultural and Environmental Sciences**, p. e240012-e240012, 2024. DOI: <https://doi.org/10.46420/TAES.e240012>. Disponível em: https://editorapantanal.com.br/journal/index.php/taes/pt_BR/article/view/18. Acesso em: 02 jan. 2026.

PERES, B. P.; BRAGA, A. R. C.; FERNANDES, S. S. Sustainable production of the organomineral fertilizers from microalgae cultivated in some industrial effluents. **Chemical Engineering Journal**, p. 170120, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.170120>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894725109637>. Acesso em: 16 jan. 2026.

R CORE TEAM (2024). *_R: A Language and Environment for Statistical Computing_*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 12 out. 2025.

REDA, A.; HAILU, A. H. Extensive utilization of inorganic fertilizers in ethiopian agriculture and its possible consequences on soil quality. **Journal of Integrative Agricultural Science**, v. 13, n. 4, p. 155-171, 2017. DOI: <https://doi.org/10.5829/idosi.wjas.2017.155.171>. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/324389330_Extensive_Utilization_of_Inorganic_Fertilizers_in_Ethiopian_Agriculture_and_Its_Possible_Consequences_on_Soil_Quality. Acesso em: 02 jan. 2026.

RUPAWALLA, Z. et al. Germination screen for microalgae-generated plant growth biostimulants. **Algal Research**, v. 66, p. 102784, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2022.102784>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2211926422001552?via%3Dihub>. Acesso em: 02 jan. 2026.

SALEH, I. A.; ZOUARI, N.; AL-GHOUTI, M. A. Removal of pesticides from water and wastewater: Chemical, physical and biological treatment approaches. **Environmental Technology & Innovation**, v. 19, p. 101026, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101026>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352186420313262?via%3Dihub>. Acesso em: 02 jan. 2026.

SÁNCHEZ-QUINTERO, Á.; FERNANDES, S. C. M.; BEIGBEDER, J. B. Overview of microalgae and cyanobacteria-based biostimulants produced from wastewater and CO₂ streams towards sustainable agriculture: A review. **Microbiological Research**, v. 277, p. 127505, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.micres.2023.127505>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0944501323002070?via%3Dihub>. Acesso em: 02 jan. 2026.

SANT'ANNA, C. L. et al. *Atlas de cianobactérias e microalgas de águas continentais brasileiras*. São Paulo, Instituto de Botânica, Núcleo de Pesquisa em Ficologia, 2012. ISBN: 978-85-7523-040-4. Disponível em: www.ibot.sp.gov.br. Acesso em: 15 jul. 2025.

SANTANA, J. et al. Cultivation of *Chlorella* sp. in Photobioreactors: Potential for Bioremediation of Synthetic Soy Milk Effluents and Biofuel Production. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, p. 117996, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.117996>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2213343725026922?via%3Dihub>. Acesso em: 02 jan. 2026.

SANTOS, M. G. B. et al. Microalgae biomass production for biofuels in Brazilian scenario: a critical review. **BioEnergy Research**, v. 14, n. 1, p. 23-42, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12155-020-10180-1>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12155-020-10180-1>. Acesso em: 02 jan. 2026.

SINGH, U.; PANDEY, R. S. Fertilizer industry effluent induced hematological, histopathological and biochemical alterations in a stinging catfish, *Heteropneustes fossilis* (Bloch, 1794). **Environmental and Sustainability Indicators**, v. 10, p. 100110, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indic.2021.100110>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2665972721000118>. Acesso em 16 jan. 2026.

SOUZA NETTA, M. A. et al. Estímulo sobre a germinação e desenvolvimento inicial de milho cultivar AS 1820 com bioestimulante Stimullum®. **Brazilian Journal of Science**, v. 1, n. 11, p. 100-107, 2022. DOI: <https://doi.org/10.14295/bjs.v1i11.220>. Disponível em: <https://periodicos.cerradopub.com.br/bjs/article/view/220>. Acesso em: 02 jan. 2026.

SPERLING, M. V. *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. Vol. 1. 4. ed.* Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental/UFMG, 2007. ISBN: 9788542300536.

SUPRAJA, K. V.; BEHERA, B.; BALASUBRAMANIAN, P. Efficacy of microalgal extracts as biostimulants through seed treatment and foliar spray for tomato cultivation. **Industrial crops and products**, v. 151, p. 112453, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112453>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926669020303691?via%3Dihub>. Acesso em: 02 jan. 2026.

VIEGAS, C.; GOUVEIA, L.; GONÇALVES, M. Evaluation of microalgae as bioremediation agent for poultry effluent and biostimulant for germination. **Environmental Technology & Innovation**, v. 24, p. 102048, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.102048>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352186421006969?via%3Dihub>. Acesso em: 02 jan. 2026.

VINOTHKUMAR, V. et al. Rice straw biostimulants: Phytochemicals and effects on maize growth and tomato yield. 2025. **Plant Science Today**, Vol. 12 No. 1 (2025), 2348-1900. DOI:

<https://doi.org/10.14719/pst.5111>. Disponível em:
<https://horizonpublishing.com/journals/index.php/PST/article/view/5111>. Acesso em: 02 jan. 2026.

WANG, X. et al. Combination of electrolysis and microalgae cultivation for beneficial reuse of fertilizer wastewater from poultry manure anaerobic digestion effluent. **Desalination and Water Treatment**, v. 183, p. 139-148, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5004/dwt.2020.25042>. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1944398624096310?via%3Dihub>. Acesso em: 02 jan. 2026.

WANG, X. et al. Microalgae cultivation and culture medium recycling by a two-stage cultivation system. **Frontiers of Environmental Science & Engineering**, v. 12, n. 6, p. 14, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11783-018-1078-z>. Disponível em:
<https://link.springer.com/article/10.1007/s11783-018-1078-z>. Acesso em: 02 jan. 2026.

YUAN, Z. et al. Microalgae self-selected indigenous aerobic denitrifying bacteria drive pollutants and antibiotic resistance genes removal in swine wastewater: Insights into the efficiency and mechanism. **Journal of Water Process Engineering**, v. 77, p. 108504, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.108504>. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214714425015776>. Acesso em: 16 jan. 2026.

ZAPATA, D. et al. Phytohormone production and morphology of *Spirulina platensis* grown in dairy wastewaters. **Algal Research**, v. 59, p. 102469, 2021. DOI:
<https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102469>. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2211926421002885?via%3Dihub>. Acesso em: 02 jan. 2026.

ZHANG, L. et al. Microalgae-assisted heterotrophic nitrification-aerobic denitrification process for cost-effective nitrogen and phosphorus removal from high-salinity wastewater: performance, mechanism, and bacterial community. **Bioresource Technology**, v. 390, p. 129901, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129901>. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852423013299>. Acesso em: 16 jan. 2026.

CAPÍTULO II

BIOFERTILIZANTE DE MICROALGAS CULTIVADAS EM EFLUENTE DE BIOPESTICIDAS E BIOFERTILIZANTES E SEU EFEITO NO DESENVOLVIMENTO INICIAL DO MILHO

3 CAPÍTULO II: Biofertilizante de microalgas cultivadas em efluente de biopesticidas e biofertilizantes e seu efeito no desenvolvimento inicial do milho

RESUMO

O uso de fertilizantes convencionais é necessário para a manutenção da produtividade das culturas no campo. Entretanto, a aplicação desses produtos pode causar danos à fertilidade do solo a longo prazo quando manejados de forma inadequada. Além disso, a indústria de fertilizantes gera efluentes com alto potencial poluidor dos corpos hídricos, assim como a indústria de biopesticidas, que vem crescendo atualmente. Dessa forma, uma alternativa para mitigar esse problema é o tratamento biológico com microalgas, que reduz poluentes e gera bioprodutos como o biofertilizante. O estudo avaliou o potencial de microalgas cultivadas em ARBB como biofertilizante para o desenvolvimento inicial do milho cv. AG1051. Foram analisadas as concentrações de poluentes como NT, NA, P, DQO no efluente bruto e no biofertilizante (ARBB + microalgas). O inóculo utilizado no cultivo continha as cepas *Chlorella* sp., *Spirogyra* sp., *Nostoc* sp. e *Eudonira* sp. O biofertilizante de microalgas foi centrifugado para concentrar nutrientes na biomassa. O experimento foi realizado em vasos de 3,6 L preenchido com solo classificado como Planossolo Háplico, coletado da camada 0–20 cm, avaliando-se os seguintes tratamentos baseados na recomendação da adubação nitrogenada para a cultura e fase de cultivo: T1 (água – controle), T2 (100 % ureia), T3 (80 % ureia e 20 % biofertilizante), T4 (60 % ureia e 40 % biofertilizante) e T5 (100 % biofertilizante). Foram realizados dois cultivos do milho, o primeiro após a aplicação dos tratamentos e o segundo consecutivo ao primeiro e sem nova aplicação, avaliando-se o efeito residual dos tratamentos, ambos com duração de 30 dias. Os parâmetros morfológicos analisados foram: altura da parte aérea, diâmetro de colmo, número de folhas, área foliar, e massa fresca e seca da parte aérea. Após o cultivo das microalgas, aumentou-se o pH da solução biofertilizante, enquanto os valores de CE e salinidade reduziram. Também houve redução na concentração dos poluentes analisados na solução. Observou-se, ainda, a presença de nutrientes como N e P na biomassa de microalgas, com concentração de 4214,6 mg L⁻¹ de NT após a centrifugação do biofertilizante. Ao final dos dois cultivos, não houve diferença estatística entre os tratamentos em nenhum dos parâmetros avaliados. Entretanto, as menores médias, em geral, foram observadas no tratamento controle em ambos os cultivos. No segundo cultivo, nota-se também que o T2 obteve médias menores do que as obtidas pelos tratamentos contendo biofertilizante. Portanto, verificou-se que existe um potencial de uso do biofertilizante obtido na agricultura, contudo necessita-se de mais estudos envolvendo a técnica de aplicação e com tempo maior de

cultivo para obtenção de resultados mais conclusivos.

Palavras-chave: *Zea mays* L.; resíduos agroindustriais; reuso; bioinsumos; fertilizantes alternativos.

3.1 Introdução

Os fertilizantes convencionais são uma forma de fornecer os nutrientes necessários para as culturas, sendo os mais usados à base de potássio, nitrogênio e fósforo (Brasil, 2020). Os autores anteriores afirmam que mais de 80 % desses insumos utilizados no Brasil são de origem estrangeira, demonstrando alta dependência do mercado externo. Entre janeiro e novembro de 2025, o país importou 41,73 milhões de toneladas de fertilizantes (Brasil, 2025). O uso dos fertilizantes é necessário para manter a alta produtividade no campo. Contudo, é preciso aplicar esses produtos de forma correta a fim de minimizar impactos ambientais, como a redução da fertilidade do solo e a sua lixiviação, que reduzem a eficiência da aplicação (ABAY, *et al.*, 2025; Cornet *et al.*, 2022).

Além dos impactos ambientais relacionados à aplicação de fertilizantes, a produção desses insumos também gera resíduos. Os efluentes da indústria de fertilizantes possuem uma alta concentração de compostos nitrogenados e fosfatados, que têm elevado potencial de poluição ambiental quando descartados nos corpos hídricos sem o tratamento adequado (Bagastyo *et al.*, 2017; Son *et al.*, 2019).

Outro insumo agrícola relevante atualmente é o biopesticida, que utiliza compostos biológicos como fungos e bactérias para o controle de pragas e doenças em plantas. Para o cultivo desses microrganismos, são necessários meios de cultura ricos em nutrientes, podendo ser utilizados inclusive resíduos agroindustriais para esse fim (Ferreyra-Suarez, García-Depraect e Castro-Muñoz, 2024; Sala *et al.*, 2021). O mercado de biopesticidas vem crescendo nos últimos anos, surgindo como uma alternativa sustentável para o manejo de pragas principalmente no continente americano (Jallouli *et al.*, 2020). Com o crescimento dessa indústria, a geração de águas residuárias advindas dos bioprocessos também aumenta.

O tratamento de efluentes é necessário para melhorar os aspectos físicos, químicos e biológicos da água. Os efluentes agroindustriais contêm diversos contaminantes, principalmente nitrogênio e fósforo (Boudiombo *et al.*, 2023). Tendo em vista o avanço da urbanização, industrialização e impactos da densidade demográfica é de suma importância o desenvolvimento de novos métodos que garantam um menor impacto ambiental, que auxiliem na remediação hídrica, considerando a preocupação atual com a escassez de água (Worku *et al.*, 2025).

A necessidade de inovações faz com que o tratamento à base de microalgas surja como opção viável, uma vez que esses microrganismos possuem potencial para a biorremediação de efluentes, acumulando nutrientes como amônia, fósforo e metais pesados (Priya, *et al.*, 2025).

Sabe-se que as microalgas são eficientes para o tratamento de águas residuárias e a biomassa produzida através desse processo apresenta aptidão para produção de bioprodutos, como o biofertilizante, devido à sua concentração de matéria orgânica e nutrientes (Mendonça Ometto e Otenio, 2017; Souza *et al.*, 2022).

O biofertilizante de microalgas é uma opção que oferece vantagens quanto à melhoria da biologia do solo, pois o corpo fotossintético da microalga libera oxigênio, que por sua vez aumenta a proliferação de bactérias benéficas (Nie *et al.*, 2020). Em culturas como a do milho, a planta absorve mais nutrientes, apresenta maior crescimento e pode apresentar maior resistência à fatores bióticos e abióticos, devido aos fitormônios presentes nas microalgas (Pourbabae, *et al.*, 2025; Vinothkumar *et al.*, 2025).

O milho é uma das culturas mais exploradas no mundo. O Brasil se destaca na produção sendo um dos líderes mundiais juntamente da China e dos Estados Unidos, representando 11,7% da produção mundial e essa alta produtividade pode ser associada ao uso de fertilizantes (Brasil, 2024). Nesse sentido, a aplicação de biofertilizantes de microalgas, visando reduzir o uso de fertilizantes minerais é uma importante alternativa para a promoção de uma agricultura sustentável (Rahman *et al.*, 2025), principalmente no cultivo de grãos produzidos em larga escala.

O estudo se propõe a avaliar o desempenho do biofertilizante de microalgas quando usado de forma integral ou fracionado associado à ureia, para adubação nitrogenada do milho em crescimento inicial.

3.2 OBJETIVO

3.2.1 Objetivo geral

Produzir biofertilizante a partir do mix de microalgas (*Chlorella* sp., *Spirogyra* sp., *Eudonira* sp. e *Nostoc* sp.) cultivadas em água residuária de biopesticidas e biofertilizantes (ARBB) e utilizá-lo como fonte de nitrogênio no cultivo do milho, avaliando seu desenvolvimento inicial.

3.2.2 Objetivos específicos

Produzir biofertilizante de microalgas cultivadas em ARBB;

Realizar a caracterização físico-química do bioproduto, visando obter a concentração de nutrientes a serem disponibilizados às plantas;

Realizar a aplicação do biofertilizante concentrado puro e associado à ureia, em comparação com o uso exclusivo da ureia e com a não aplicação de fertilizantes nitrogenados

na cultura do milho cv. AG1051; e

Avaliar o desenvolvimento inicial do milho até os 30 dias após o plantio, para os diferentes tratamentos de adubação nitrogenada, por meio da análise de parâmetros morfológicos.

3.3 MATERIAL E MÉTODOS

3.3.1 Caracterização da Água Residuária de Biopesticidas e Biofertilizantes

A Água Residuária de Biopesticidas e Biofertilizantes (ARBB) foi cedida pela empresa AGRIBIO, que está presente na Incubadora de Agronegócios da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), localizada na Rodovia BR 465 km 47, Câmpus da UFRRJ, Seropédica, Rio de Janeiro, Brasil. O efluente cedido é resultante dos processos de produção de biofertilizantes, corretivos orgânicos e produtos de controle biológico contendo bactérias e fungos benéficos às plantas.

A caracterização da água residuária foi realizada conforme metodologia do *Standart methods* (APHA, 2017), por meio dos kits de análise da empresa ALFAKIT. Foram analisadas as concentrações de Demanda Química de Oxigênio (DQO), Nitrogênio Total (NT), Nitrogênio Amoniacal (NA), Nitrato (NO_3^-), Fósforo (P), Potássio (K^+), Sulfato (SO_4^{2-}), Alumínio (Al^{+3}), Cálcio (Ca^{+2}) e Magnésio (Mg^{+2}). Também foram analisados os parâmetros de potencial hidrogeniônico (pH), condutividade elétrica (CE), salinidade e temperatura. Todas as análises físico-químicas foram feitas em triplicata e realizadas no Laboratório de Tecnologias Ambientais e Bioenergia (LabTec), localizado no Instituto de Tecnologia da UFRRJ. Para a leitura das análises químicas utilizou-se um espectrofotômetro (Hach; DR3900). Para leitura do pH, CE, salinidade e temperatura, utilizou-se um sensor multiparâmetro digital (ASKO; M4258).

Também foram avaliados os parâmetros de Carbono Orgânico Total (COT), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e Relação C:N. O COT foi calculado a partir da Equação 1 (Bouwer e Chaney, 1974):

$$\text{COT} = 0,25 \times \text{DQO} + 1,3 \quad (1)$$

A relação C:N foi calculada utilizando os valores de COT e NT. Para estimativa da DBO, utilizou-se a Equação 2 (Sperling, 2007):

$$DBO = f \times DQO \quad (2)$$

em que:

f: grau de biodegradabilidade do efluente, sendo adotado o valor 0,6 conforme recomendado por Sperling (2007).

Na Tabela 6, observam-se os parâmetros físico-químicos da ARBB utilizada.

Tabela 6. Valores dos parâmetros físico-químicos da água residuária de biopesticidas e biofertilizantes utilizada.

Parâmetro	Média	DP
Nitrato (mg L ⁻¹)	13,30	± 0,00
Nitrogênio Amoniacal (mg L ⁻¹)	4030,00	± 12,00
Nitrogênio Total (mg L ⁻¹)	4900,00	± 0,00
DQO (mg L ⁻¹)	2300,00	± 0,00
DBO (mg L ⁻¹)	1380,00	± 0,00
COT (mg L ⁻¹)	576,30	± 0,00
C:N	0,118	-
Fósforo (mg L ⁻¹)	497,0	± 0,87
Potássio (mg L ⁻¹)	20,30	± 0,29
Alumínio (mg L ⁻¹)	0,458	± 0,00
Sulfato (mg L ⁻¹)	45,00	± 0,00
Cálcio (mg L ⁻¹)	0,00	± 0,00
Magnésio (mg L ⁻¹)	14,40	± 0,00
pH	6,20	± 0,13
Condutividade elétrica (µS cm ⁻¹)	1890	± 10,00
Salinidade (ppm)	950	± 0,00

DP: Desvio-padrão.

3.3.2 Produção do biofertilizante a base de microalgas

A produção do biofertilizante foi realizada no LabTec. O mix de microalgas utilizado como inóculo continha as cepas *Chlorella* sp., *Spirogyra* sp., *Nostoc* sp. e *Eudonira* sp. e foi obtido no banco de cultivos do próprio laboratório (Figura 5). As condições de cultivo dos inóculos, produzidos em fotobiorreatores de coluna com 1,5, 2 e 3 L, incluíam a aeração do sistema por meio de compressor de ar com taxa de 2 L O₂ min⁻¹ e iluminação artificial utilizando 2 lâmpadas LED de 40 Watts cada, ambos funcionando 24 h d⁻¹. Já o cultivo das microalgas para obtenção do biofertilizante foi realizado em fotobiorreatores de coluna com volume total de 5,0 L e volume útil de 4,0 L. Utilizou-se uma proporção de 0,670 L de inóculo para 3,33 L de ARBB, segundo metodologia adaptada de Mendonça *et al.* (2022). A homogeneização do sistema foi feita a partir de um compressor de ar funcionando 24h d⁻¹ com taxa de 2 L O₂ min⁻¹ e a iluminação foi fornecida por iluminação artificial 24h d⁻¹ com uso de 4 lâmpadas LED de

40 Watts cada, com uma irradiância média de $84 \mu\text{mol}/\text{m}^2.\text{s.}$, ainda conforme metodologia adaptada de Mendonça *et al.* (2022). Para a produção da quantidade necessária de biofertilizante, foram feitas 5 bateladas, cada uma contendo 6 fotobiorreatores.



Figura 5. Detalhe do banco de cultivo do mix de microalgas para posterior uso na produção do biofertilizante.

Para monitorar o crescimento das microalgas mediu-se a densidade óptica (DO) a 540 nm em um espectrofotômetro (Hach; DR3900) e os parâmetros de pH, CE, salinidade e temperatura com sensor multiparâmetro (ASKO; M4258) duas vezes ao dia, até o cultivo atingir a estabilidade. Considerou-se a estabilização do cultivo a partir da observação do decréscimo dos valores médios da DO diária. A identificação das microalgas presentes nos cultivos foi feita com uso de microscópio óptico (Biofocus; BLUE1600), utilizando o Atlas de Cianobactérias e Microalgas de Águas Continentais Brasileiras (Sant'Anna *et al.*, 2012). Após esse período, retirou-se o conteúdo sobrenadante dos cultivos para obtenção da biomassa de microalgas (Figura 6) utilizando centrífuga digital (Anco; CD22000) a 8000 rpm. A solução sobrenadante foi separada com auxílio de pipeta graduada, removendo-se aproximadamente 97,78% do conteúdo líquido das amostras, que foi descartado posteriormente. A biomassa resultante da retirada do sobrenadante foi congelada para posterior utilização como biofertilizante.



Figura 6. Biofertilizante de microalgas antes e depois da centrifugação para obtenção da biomassa concentrada com retirada de 97,78% da solução sobrenadante.

3.3.3 Caracterização do biofertilizante

A caracterização do biofertilizante foi realizada no LabTec, conforme metodologia do *Standart methods* (APHA, 2017), por meio dos kits de análise da empresa ALFAKIT. Cada análise foi feita em triplicada. Foram analisadas as concentrações de DQO, NT, NA, NO_3^- , P, K^+ , SO_4^{2-} , Al^{+3} , Ca^{+2} e Mg^{+2} dos cultivos de cada batelada antes da centrifugação. Analisou-se também as concentrações de NT, NA e NO_3^- da biomassa de microalgas concentrada obtida ao final de cada batelada. Os resultados das análises da biomassa concentrada foram utilizados para o cálculo da dose do biofertilizante. Para leitura das análises químicas utilizou-se um espectrofotômetro (Hach; DR3900). Os parâmetros de COT, DBO e relação C:N dos cultivos antes da remoção do sobrenadante também foram avaliados, conforme metodologia descrita no item 3.3.1.

3.3.4 Caracterização do solo utilizado no cultivo do milho

O solo utilizado no plantio do milho foi coletado em área de ocorrência de Planossolo Háplico, classificado de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos *et al.* 2018). A caracterização físico-química do solo foi realizada com amostras deformadas e indeformadas, coletadas na profundidade de 0 – 20 cm. As amostras deformadas foram secas ao ar, destorroadas e peneiradas em malha 4,75 mm. Determinou-se a umidade residual, o fator de correção “f” e a densidade do solo (Tabela 7), conforme metodologia de Teixeira *et al.* (2017), por meio das Equações 5, 6 e 7. Para cada determinação, foram realizadas 5 repetições.

$$U_r = \frac{M_{ar} - M_{estufa}}{M_{estufa}} \quad (5)$$

$$f = \frac{M_{ar}}{M_{estufa}} \quad (6)$$

$$D_s = \frac{m}{V} \quad (7)$$

em que:

U_r : umidade gravimétrica residual, g g^{-1} ;

M_{ar} : massa da amostra seca a ar (com umidade residual), g;

M_{estufa} : massa da amostra seca a 105 °C até atingir o peso constante, g;

f : fator de correção da massa de solo a ser utilizado para a massa de solo seca (sem umidade), g g^{-1} ;

D_s : densidade do solo, g cm^{-3} ;

m : massa da amostra indeformada seca em estufa a 105 °C até atingir o peso constante, g;

V : volume do anel amostrador, cm^3 .

Tabela 7. Umidade gravimétrica residual, fator de correção “F” e densidade do solo utilizado no estudo.

Parâmetro	Umidade Residual (g g^{-1})	Fator de correção “F” (g g^{-1})	Densidade do solo (g cm^{-3})
Média	0,0061	1,0061	1,55
DP	0,0011	0,0011	0,12
CV (%)	17,7121	0,1069	7,59

DP: Desvio-padrão; CV: Coeficiente de variação.

Também foi realizada a análise granulométrica e o grau de floculação, em três repetições, de amostras do solo utilizado no experimento conforme metodologia proposta pelos autores anteriores, com os resultados apresentados na Tabela 8.

Tabela 8. Valores médios dos atributos físicos do solo.

Camada do solo	Parâmetros						
	Areia Fina	Areia Grossa	Areia Total	Silte	Argila Natural	Argila Total	Grau de Floculação
cm	-----			%	-----		
0 - 20	30,46	49,42	82,46	7,37	7,03	10,18	30,90

A análise química do solo foi realizada com três repetições, conforme métodos atestados pela EMBRAPA (Teixeira *et al.*, 2017). Os seguintes atributos foram analisados: pH, acidez potencial ($\text{H} + \text{Al}^{3+}$), alumínio (Al^{3+}), cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), potássio (K^+), fósforo (P), sódio (Na^+), soma de bases (S), capacidade de troca de cátions (T), matéria orgânica do solo (MO) e a saturação de bases (V). Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9. Valores médios dos atributos químicos do solo.

ΔZ	Ca	Mg	H^+ Al	Al	Na	S	T	K	P	V	pH	MO
cm	-----			$\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$	-----			--- mg L^{-1} ---		%	água	g kg^{-1}
0-20	1,16	0,72	1,26	0,00	0,06	1,96	3,22	5,00	21,00	60,70	5,30	27,90

ΔZ : camada do solo analisada; Na: Sódio; Ca: Cálcio; Mg: Magnésio; K: Potássio; H⁺/Al: Acidez potencial; Al: Alumínio; S: Soma de bases trocáveis; T: Capacidade de troca de cátions; V: Percentagem de saturação por bases; P: Fósforo; pH: Potencial hidrogeniônico; MO: matéria orgânica.

A partir dos resultados observados na Tabela 9 e das recomendações para a cultura do milho contidas no Manual de Calagem e Adubação do Estado do Rio de Janeiro (Freire *et al.*, 2013), foi verificado que havia necessidade de realização de correção química preliminar ao experimento. Realizou-se primeiramente a correção do pH do solo e dos teores de Ca²⁺ e Mg²⁺ por meio da calagem, sendo aplicado a dose de 1,2 Mg de calcário com PRNT de 100% para 2000 m³ de solo. Para isso, a umidade do solo foi elevada a 70% da capacidade de campo (0,161 cm³ cm⁻³) e então fez-se a incorporação do calcário no solo. Para incubação de forma célere após a calagem, o solo foi ensacado em sacos plásticos hermeticamente fechados, onde permaneceu durante 30 dias.

Foi necessária também a correção química de P₂O₅ e de K₂O com a aplicação de superfosfato triplo (ST) e cloreto de potássio (KCl) em dose única no plantio, ambos na recomendação de 40 kg ha⁻¹, totalizando em ST na dose de 0,23 g vaso⁻¹ e KCl na dose de 0,16 g vaso⁻¹.

Após secagem e caracterização, o solo foi acondicionado em vasos de cerca de 3,6 L (19 cm de altura x 19 cm de diâmetro superior x 15 cm de diâmetro na base) que possuíam a parte basal perfurada. O fundo dos vasos foi coberto com uma camada de 2,0 cm de brita, sobreposta por uma manta geotêxtil bidim, visando obter a drenagem adequada e evitar perda de solo. Para a determinação da massa de solo seco ao ar a ser acondicionada em cada vaso empregou-se a Equação 8. Para isso, utilizou-se o volume útil de 3200 cm³. Foi preenchido 2/3 do volume com o solo sob a densidade natural no local de coleta (massa de solo seco de 3326,8 g), e 1/3 do volume (1066,67 cm³) com substrato Carolina Soil 2100, que de acordo com o fabricante apresenta pH de 5,8 e CE de 0,1 dS m⁻¹, composto com 50% de turfa de sphagnum e 50% de perlita. Após a mistura do solo com substrato, fez-se o acondicionamento da mistura no interior do vaso.

$$M_{Ur} = D_s \cdot f \cdot V_{vaso} \quad (8)$$

em que:

M_{Ur}: massa de solo com umidade residual (seco ao ar), g;

D_s: densidade do solo, g cm⁻³; e,

V_{vaso}: volume referente a 2/3 do volume útil do vaso a ser preenchido, g cm⁻³.

3.3.5 Cálculo da dose de biofertilizante

O biofertilizante de microalgas foi utilizado como fonte de N para a cultura do milho em desenvolvimento inicial. O cálculo da dose de biofertilizante (D_{AR}) foi realizado conforme metodologia DEA/UFV (Matos e Matos, 2017) por meio da Equação (9).

$$D_{AR} = \frac{1000 \times [N_{abs} - (T_{m1} \times MO \times \rho_s \times p \times 10^7 \times 0,05 \times \frac{n}{12})]}{[T_{m2} \times \frac{n}{12} \times N_{org} + (N_{amon} + N_{nitrato}) \times PR]} \quad (9)$$

em que:

D_{AR} : dose de aplicação ($m^3 ha^{-1}$);

N_{abs} : absorção de nitrogênio pela cultura ($kg ha^{-1}$);

T_{m1} : taxa anual de mineralização da matéria orgânica anteriormente existente no solo ($0,01 a 0,15 kg kg^{-1} ano^{-1}$);

MO : conteúdo de matéria orgânica do solo ($kg kg^{-1}$);

ρ_s : massa específica do solo ($t m^{-3}$);

p : profundidade do solo (m);

n : fração do ano relativa ao período de cultivo (ano);

T_{m2} : taxa de mineralização do nitrogênio orgânico ($kg kg^{-1} ano^{-1}$);

N_{org} : nitrogênio orgânico ($mg L^{-1}$);

N_{amon} : nitrogênio amoniacal ($mg L^{-1}$);

$N_{nitrato}$: nitrogênio nítrico ($mg L^{-1}$);

PR : proporção na recuperação de nitrogênio mineral pela cultura ($kg kg^{-1}$).

A necessidade de Nitrogênio demandada pela cultura do milho em fase inicial é de $26,67 kg ha^{-1}$ (Freire *et al.*, 2013), sendo assim, utilizou-se esse valor para o N_{abs} . Adotou-se valor de $0,01 kg kg^{-1} ano^{-1}$ para o T_{m1} , $0,5 kg kg^{-1} ano^{-1}$ para o T_{m2} e $0,5 kg kg^{-1}$ para PR (Matos e Matos, 2017). Os valores de MO e ρ_s foram obtidos com análise do solo descrita no item 3.3.4, enquanto os valores de N_{amon} e $N_{nitrato}$ foram obtidos pela análise da biomassa de microalgas concentrada. O N_{org} foi calculado conforme a Equação 10:

$$N_{or} = N_T - N_{amon} - N_{nitrato} \quad (10)$$

em que:

N_T : nitrogênio total ($mg L^{-1}$);

3.3.6 Cultivo do milho em fase inicial e delineamento experimental

O experimento foi realizado no Instituto de Tecnologia da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. O município de Seropédica está localizado em região de clima Aw, segundo a classificação de Köppen (Alvares *et al.*, 2013), com chuvas concentradas nos meses de novembro a março, com médias anuais de precipitação e temperatura variando de 1.300 a 1.600 mm e de 22 a 24 °C, respectivamente (Silva *et al.*, 2024).

O plantio do milho híbrido cv. AG1051, da empresa AgRoss, Brasil, foi realizado em bancada ao ar livre, com uso de sombrite 30%. Foram utilizados vasos de 3,6 L, preenchidos com mistura de solo + Carolina Soil 2100, conforme item 3.3.4. Foram semeadas 3 sementes por vaso e 7 dias após a emergência (DAE) foi feito o desbaste, mantendo-se 1 planta por vaso.

Os tratamentos analisados foram baseados na recomendação de adubação nitrogenada para a cultura, a saber: T1 (água – controle, sem N), T2 (100 % ureia), T3 (80 % ureia e 20 % biofertilizante), T4 (60 % ureia e 40 % biofertilizante) e T5 (100 % biofertilizante). As doses de ureia foram calculadas segundo Freire *et al.* (2013) e aplicadas em grânulos, enquanto as doses do biofertilizante foram calculadas conforme metodologia do item 3.3.5, seguindo os percentuais de cada tratamento na recomendação adotada. A aplicação dos tratamentos foi feita de forma manual em cobertura, no plantio. O experimento foi realizado em Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC), com 5 tratamentos e 7 repetições, totalizando 35 unidades experimentais. O croqui do delineamento experimental está apresentado na Figura 7.

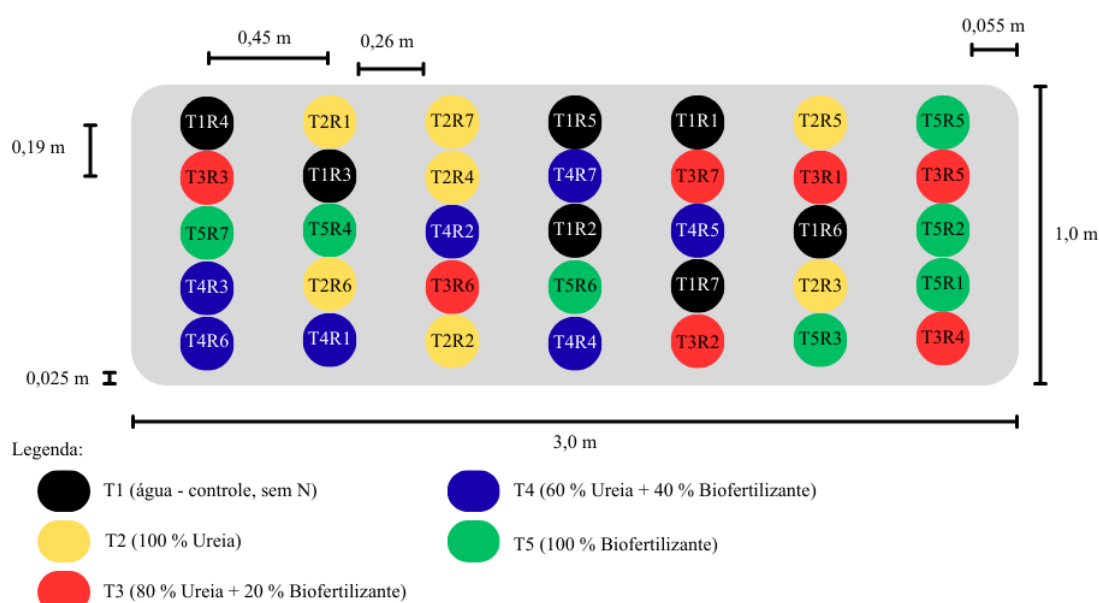


Figura 7. Croqui da distribuição dos tratamentos analisados de acordo com o delineamento inteiramente casualizado.

O experimento foi feito em 2 rodadas, a primeira com a aplicação dos tratamentos e

avaliação dos resultados após 30 dias após o plantio (DAP) e a segunda com o plantio do milho subsequente, sem a reaplicação dos insumos, para análise dos efeitos residuais dos tratamentos após 30 DAP. O primeiro cultivo foi feito entre os meses de agosto e setembro de 2025, enquanto o segundo cultivo foi realizado entre os meses de setembro e outubro de 2025.

3.3.7 Manejo de irrigação do cultivo de milho

A irrigação do cultivo do milho foi realizada manualmente, aplicando-se as lâminas de água com o auxílio de proveta graduada com capacidade de 50 ml. O cálculo da lâmina de irrigação foi feito por meio da Equação 11:

$$ET_c = ET_0 \times K_c \quad (11)$$

em que:

ET_c: estimativa da evapotranspiração da cultura;

ET₀: evapotranspiração de referência;

K_c: coeficiente da cultura.

Utilizou-se o método de Penman-Monteith FAO para calcular a estimativa da evapotranspiração (ET₀) da cultura (Allen *et al.*, 1998). O K_c da cultura do milho selecionado para estimativa da evapotranspiração foi de 0,71, de acordo com o estágio de desenvolvimento (Carvalho *et al.*, 2006). O K_c indicado pela FAO (Allen *et al.*, 1998) para a fase inicial do milho é de 0,3. Entretanto, estudo de Souza, Lima e Carvalho (2012) mostrou que para a região do RJ, valores de K_c entre 0,2 e 0,4 podem gerar estimativas subestimadas para a irrigação e causar estresse hídrico na cultura. Optou-se pelo K_c obtido por Carvalho *et al.* (2006), uma vez que o estudo foi realizado na mesma localidade e estação do ano do presente trabalho, para garantir que a cultura recebesse irrigação suficiente para seu pleno desenvolvimento na fase inicial. Salienta-se que o manejo da irrigação adotado foi diário, exceto quando ocorria precipitação superior a ET_c ocorrida no dia.

3.3.8 Avaliação dos parâmetros morfológicos das plantas de milho

Ao final dos dois cultivos (30 DAP) as 35 amostras foram colhidas para análise dos parâmetros de altura da parte aérea (HPA), diâmetro de colmo (DC) número de folhas (NF), área foliar (AF), massa fresca da parte aérea (MFPA) e massa seca da parte aérea (MSPA). A medição da HPA foi feita com auxílio de trena graduada em mm. O DC foi medido com uso de paquímetro digital (Worker; 940534) com precisão de 0,2 mm. Para obtenção da MSPA as amostras foram colocadas em sacos de papel tipo Kraft e deixadas em estufa com circulação de

ar (Ethik; EST.400.TS) a 65°C por 48h para atingirem massa constante. Para pesagem de MFPA e MSPA, utilizou-se balança (Marte; AD5002) com precisão de 0,5g. A AF foi feita em medidor de área foliar (LI-COR; LI-3100).

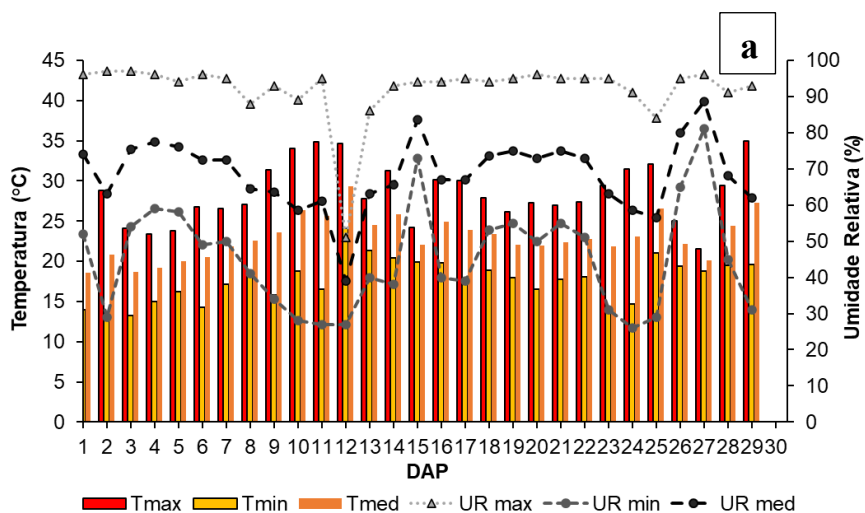
3.3.9 Análise estatística

Os dados das análises físico-químicas da ARBB bruta e do biofertilizante foram analisados conforme estatística descritiva, analisando média e desvio-padrão. Os dados dos parâmetros morfológicos das plantas de milho foram submetidos a análise de variância (ANOVA) e teste F utilizando o *Software* R versão 4.3.3 e testados para as pressuposições de homocedasticidade de variâncias (Teste de Bartlett), normalidade dos resíduos (Teste de Shapiro-Wilk) e independência dos resíduos.

3.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.4.1 Caracterização meteorológica no período de desenvolvimento do milho

Na Figura 8, observa-se os gráficos de temperatura e umidade relativa do ar durante os cultivos 1 e 2 (Figura 8a e Figura 8b). Os gráficos da ET₀ diária e acumulada dos cultivos 1 e 2 estão dispostos, respectivamente, na Figura 9a e 9b. Os dados meteorológicos foram obtidos da estação meteorológica automática localizada no município de Seropédica, denominada Ecologia Agrícola – A601, pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet).



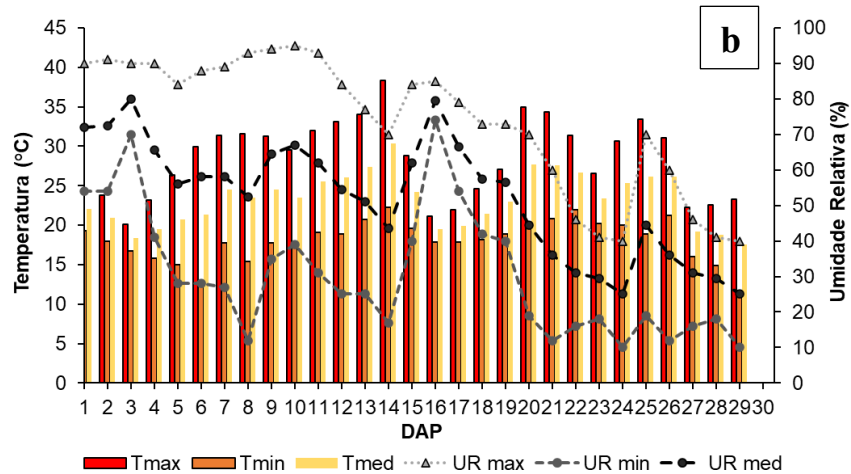


Figura 8. Valores mínimos, médios e máximos de temperatura e umidade relativa durante os cultivos 1 (a) e 2 (b).

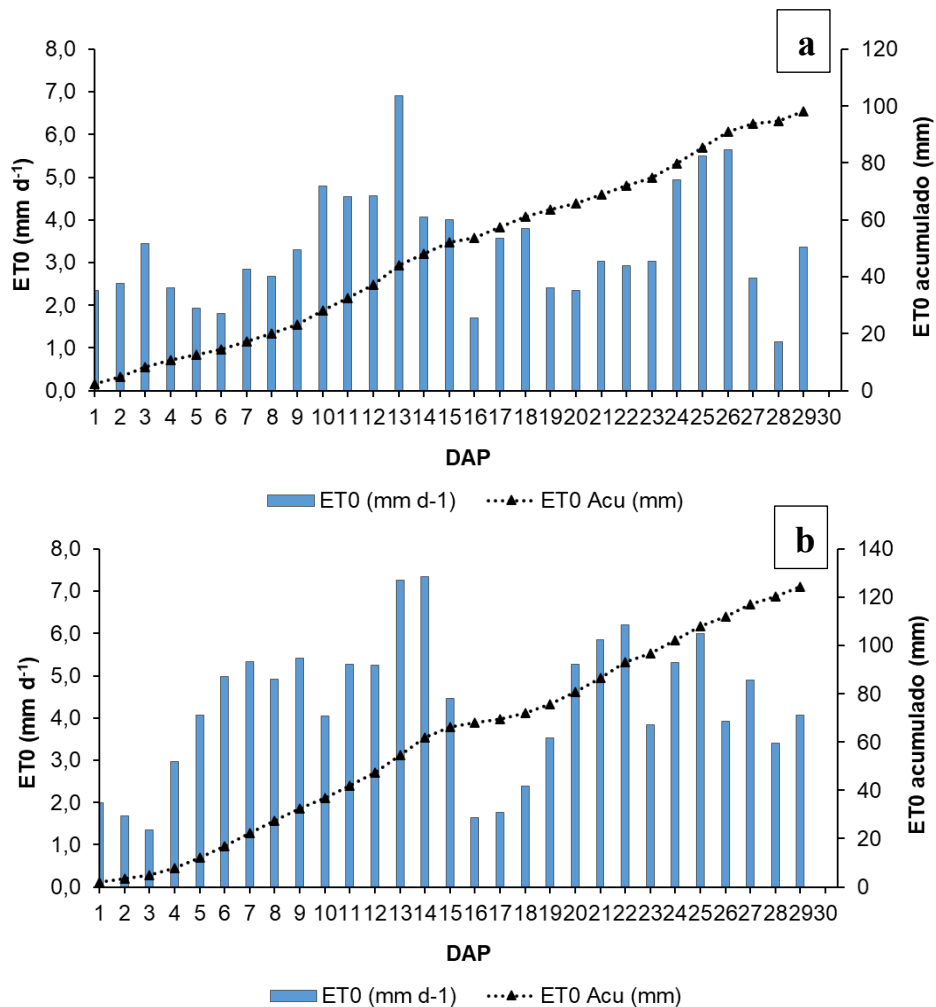


Figura 9. Estimativa da Evapotranspiração de referência (ET0) diária e acumulada durante os cultivos 1 (a) e 2 (b).

Observa-se na Figura 10 a lâmina total de água aplicada em cada planta durante os 30 dias de cultivo. No cultivo 1 (Figura 10a), a maior lâmina aplicada foi no dia 24/08/2025, com volume de 0,12 L. Durante o cultivo 2 (Figura 10b), o maior volume de água aplicado foi de

0,15 L, em 06/10/2025.

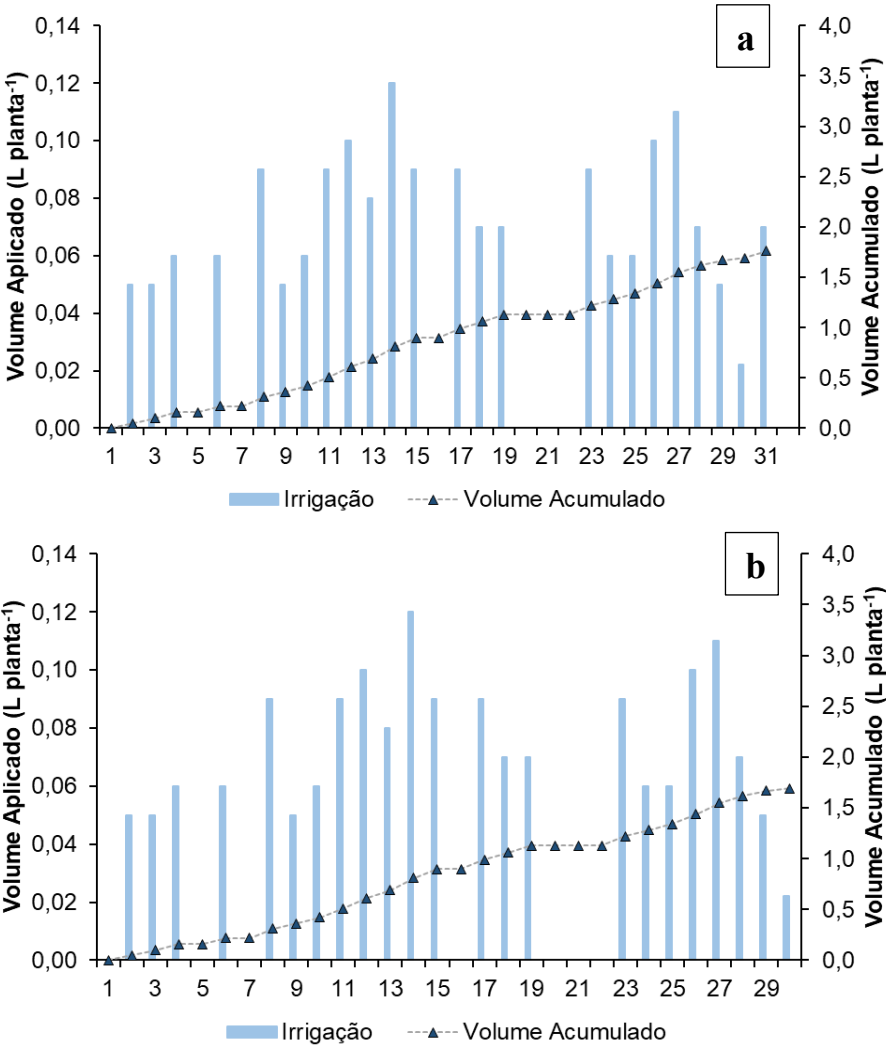


Figura 10. Lâmina total de água aplicada em cada planta de milho durante os 30 dias de experimento dos cultivos 1 (a) e 2 (b).

3.4.2 Caracterização do biofertilizante de microalgas

O cultivo de microalgas em ARBB atingiu seu ápice no 4º dia de cultivo, momento em que houve decréscimo da DO. A DO máxima foi alcançada no 3º dia ($0,694 \pm 0,34$), como observado na Tabela 10. Magyar *et al.* (2024) obtiveram DO de 0,619 em cultivos de *Chlorella* sp., utilizando soluções de Nitrogênio e Fósforo para enriquecer o meio de cultura.

Tabela 10. Valores dos parâmetros físico-químicos dos cultivos com mix de microalgas em água residuária de biopesticidas e biofertilizantes.

dia	DO	DP	pH	DP	CE ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	DP	Sal (ppm)	DP	°C	DP
1	0,248	$\pm 0,10$	8,08	$\pm 0,73$	843,56	$\pm 513,03$	412,57	$\pm 277,64$	25,47	$\pm 1,11$
2	0,603	$\pm 0,22$	8,50	$\pm 0,56$	682,62	$\pm 322,67$	342,19	$\pm 216,11$	23,12	$\pm 1,71$
3	0,694	$\pm 0,34$	8,65	$\pm 0,11$	622,17	$\pm 270,45$	310,79	$\pm 191,94$	23,04	$\pm 1,90$

4	0,640 ± 0,38	8,61 ± 0,22	617,75 ± 289,05	300,36 ± 192,68	22,62 ± 1,53
---	--------------	-------------	-----------------	-----------------	--------------

DO: Densidade Óptica; CE: Condutividade Elétrica; Sal: Salinidade; °C: Temperatura; DP: Desvio-padrão.

O pH ficou entre $8,08 \pm 0,73$ e $8,65 \pm 0,11$, valores superiores com relação ao pH da ARBB ($6,20 \pm 0,13$, Tabela 6). O aumento do pH ao longo do crescimento das microalgas em água residuária também foi observado por Moreno-Cruz *et al.* (2024), com valores de pH aumentando de 7 para 9. Esse comportamento ocorre naturalmente devido a atividade fotossintética (Beltrán-Rocha *et al.*, 2024). Houve decréscimo da CE e da Salinidade em comparação com a ARBB não tratada ($1890 \pm 10 \mu\text{S cm}^{-1}$ e 950 ppm, respectivamente, Tabela 6), demonstrando a capacidade do tratamento biológico com microalgas de melhorar a qualidade da água. A CE ao final do cultivo alcançou valor de $617,75 \pm 289,05 \mu\text{S cm}^{-1}$ e a salinidade apresentou média de $300,36 \pm 192,68$ ppm. Dagnaisser *et al.* (2024) também observaram redução na CE ao utilizarem efluente da bovinocultura para produzir biofertilizante de microalgas.

Na Tabela 11, observa-se os resultados das análises químicas do biofertilizante de microalgas antes da concentração da biomassa.

Tabela 11. Caracterização química do biofertilizante (água residuária de biopesticidas e biofertilizantes + mix de microalgas).

Parâmetro	Biofertilizante	DP
NO_3^- (mg L ⁻¹)	9,3	± 4,0
NA (mg L ⁻¹).	145,7	± 113,8
NT (mg L ⁻¹)	770,6	± 404,5
DQO (mg L ⁻¹)	825,0	± 363,1
DBO (mg L ⁻¹)	495,0	± 217,9
COT (mg L ⁻¹)	207,6	± 90,8
C:N	0,258	-
P (mg L ⁻¹)	201,6	± 124,6
K^+ (mg L ⁻¹)	9,5	± 3,6
Al^{+3} (mg L ⁻¹)	0,451	± 0,285
SO_4^{-2} (mg L ⁻¹)	50,3	± 15,5
Ca^{+2} (mg L ⁻¹)	29,1	± 21,1
Mg^{+2} (mg L ⁻¹)	12,9	± 8,6

DP: Desvio-padrão.

Os parâmetros analisados apresentaram elevado DP, tanto para as amostras antes da remoção do sobrenadante, quanto para as amostras da biomassa concentrada. Esse resultado ocorreu devido às diferenças de concentrações encontradas entre as 5 bateladas de cultivo do biofertilizante, comportamento que também se repetiu nos parâmetros de CE e salinidade. A variação entre lotes é um dos desafios do uso de microalgas como biofertilizantes e acontece

principalmente devido a variações nas cepas, no meio de cultivo e nas condições ambientais do cultivo, como a temperatura (Rahman *et al.*, 2025).

Com exceção da concentração de Ca^{+2} e da relação C:N, os demais parâmetros apresentaram valores inferiores aos encontrados na ARBB bruta (Tabela 6), indicando potencial de redução de poluentes com a utilização de microalgas. Mendonça *et al.* (2022), observaram boa capacidade de biorremediação de efluentes no tratamento com microalgas, com eficiências de remoção de poluentes como COT e DBO_5 acima de 70%.

Observou-se a presença de Ca^{+2} nas amostras de biofertilizante (ARBB + mix de microalgas), com concentrações médias de $29,1 \pm 21,1 \text{ mg L}^{-1}$. Entretanto, nas análises da ARBB bruta, não foram detectados teores de Ca^{+2} . Essa substância pode ser advinda do inóculo utilizado na produção do biofertilizante, uma vez que a manutenção dos cultivos do banco de inóculos do LabTec é feita, dentre outros, com uso de efluentes lácteos sintéticos.

Foi encontrada uma relação C:N maior nas amostras de biofertilizante, em comparação com a relação apresentada pela ARBB bruta (0,118, Tabela 6), o valor encontrado no biofertilizante foi de 0,258 (Tabela 11). A atividade biorremediadora das microalgas, assim como a capacidade de biofixação de CO_2 pode explicar o aumento da relação C:N, contribuindo para o aumento dessa relação no biofertilizante (Santana *et al.*, 2025; Santos *et al.*, 2021).

Os valores de nitrogênio encontrados no biofertilizante foram de $145,7 \pm 113,8 \text{ mg L}^{-1}$ para NA, $9,3 \pm 4,0 \text{ mg L}^{-1}$ para NO_3^- e $770,6 \pm 404,5 \text{ mg L}^{-1}$ para NT. Concentrações de 375 mg L^{-1} de NA foram obtidas por Chu *et al.* (2025) em biofertilizante de microalgas produzido em efluente de laticínios. Moreno-Cruz *et al.* (2024) encontraram valores de NO_3^- em cultivo de *Chlorella* sp. entre 50 e 60 mg L^{-1} , utilizando água residuária da bovinocultura como meio de cultura. Tal efluente apresentava concentração de NO_3^- acima de 100 mg L^{-1} , demonstrando consumo do nutriente pelas microalgas, assim como observado no presente estudo. Rempel *et al.* (2023) obtiveram $39,29 \pm 0,2 \text{ mg L}^{-1}$ de NT em cultivo de *Spirulina platensis* em efluente doméstico com duração de 30 dias.

A concentração de P no biofertilizante apresentou média de $201,6 \pm 124,6 \text{ mg L}^{-1}$, enquanto a quantidade de K^+ foi de $9,5 \pm 3,6 \text{ mg L}^{-1}$. O valor de P encontrado foi menor comparando-se com a ARBB bruta ($1890 \pm 10 \text{ } \mu\text{S cm}^{-1}$ e 950 ppm, respectivamente, Tabela 6). Esse nutriente é assimilado pelas microalgas, participando do crescimento e do metabolismo desses microrganismos (Yuan *et al.*, 2025). Mukherjee *et al.* (2016) encontraram concentrações de P de até $17,18 \pm 0,21 \text{ mg L}^{-1}$ ao testar cultivos de microalgas e cianobactérias para produção de biofertilizantes em efluente de arroz. Em biofertilizante contendo extrato de *Chlorella vulgaris*, Suchithra *et al.* (2022) obtiveram concentração de 800 mg L^{-1} de K^+ . A presença de

K^+ contribui para o uso desse tipo de material como fertilizante, sendo esse um macronutriente relevante para as plantas.

Observou-se também uma concentração de Mg^{+2} de $12,9 \pm 8,6 \text{ mg L}^{-1}$ no biofertilizante. Ferreira *et al.* (2023) obtiveram quantidade de Mg^{+2} de $5,09 \text{ mg L}^{-1}$ em cultivo de microalgas utilizando efluente da suinocultura. A presença de Mg^{+2} no meio de cultura influencia positivamente o crescimento das microalgas, aumentando sua eficiência de remoção de poluentes e a produção de biomassa (Huang *et al.*, 2024).

Para DQO e DBO, as concentrações encontradas foram de $825,0 \pm 363,1 \text{ mg L}^{-1}$ e de $495,0 \pm 217,9 \text{ mg L}^{-1}$, respectivamente. O COT apresentou média de $207,6 \pm 90,8 \text{ mg L}^{-1}$. Mesa *et al.* (2025) encontraram DQO de até $419,0 \text{ mg L}^{-1}$ ao cultivarem *Chlorella sorokiniana* em efluentes sintéticos. O alto valor de DQO encontrado no presente estudo deve-se à concentração do efluente de ARBB bruto (2300 mg L^{-1} , Tabela 6). Assim como os parâmetros de NT e P, a redução da DQO também ocorre devido à absorção dos compostos pelas microalgas, que os utilizam como fonte de nutrientes em seu ciclo de crescimento (Goswami, Mehariya e Verma, 2024).

Com relação à presença de Al^{+3} , obtiveram-se médias de $0,451 \pm 0,285 \text{ mg L}^{-1}$ nas amostras analisadas. Para a concentração de SO_4^{-2} , o valor encontrado foi de $50,3 \pm 15,5 \text{ mg L}^{-1}$. Em tratamento de efluente doméstico com microalgas para posterior uso como biofertilizante, Pineda *et al.* (2025) obtiveram concentração de SO_4^{-2} de $16,10 \text{ mg L}^{-1}$.

A biomassa resultante da retirada do conteúdo sobrenadante apresentou conteúdo de $4214,6 \pm 3547,9 \text{ mg L}^{-1}$, para NT, $3880,0 \pm 3618,0 \text{ mg L}^{-1}$, para NA e $90,0 \pm 57,6 \text{ mg L}^{-1}$ para NO_3^- (Tabela 12). A biomassa de microalgas concentrada é fonte de altas concentrações de N, possuindo bom potencial como biofertilizante (Pineda *et al.*, 2025).

Tabela 12. Concentrações médias de nitrogênio total (NT), nitrogênio amoniacal (NA) e nitrato (NO_3^-) na biomassa concentrada do biofertilizante (água residuária de biopesticidas e biofertilizantes biorremediada + mix de microalgas).

Parâmetro	Biofertilizante concentrado	DP
NT (mg L ⁻¹)	4214,6	± 3547,9
NA (mg L ⁻¹)	3880,0	± 3618,0
NO ₃ ⁻ (mg L ⁻¹)	90,0	± 57,6

DP: Desvio-padrão.

3.4.3 Cálculo da dose do biofertilizante

Conforme a Equação 9 e os valores dispostos nos itens 3.3.5 e 3.4.2, as doses de biofertilizante de microalgas calculadas para a adubação nos tratamentos foram de $4,5 \text{ mL vaso}^{-1}$.

¹ para T3 (80% ureia e 20% biofertilizante), 12,08 mL vaso⁻¹ para T4 (60% ureia e 40% biofertilizante) e 34,82 mL vaso⁻¹ para T5 (100% biofertilizante). Utilizando a metodologia de Matos e Matos (2017), Dagnaisser *et al.* (2024) calcularam dose de 862 mL vaso⁻¹ para biofertilizante de microalgas cultivadas em efluentes da bovinocultura para posterior aplicação na cultura da rúcula.

3.4.4 Avaliação dos parâmetros morfológicos

3.4.4.1 Cultivo 1

Nas plantas do cultivo 1 avaliadas aos 30 DAP (Figura 11), não foram observadas diferenças estatísticas segundo o teste F entre as médias para os parâmetros HPA, DC e AF.

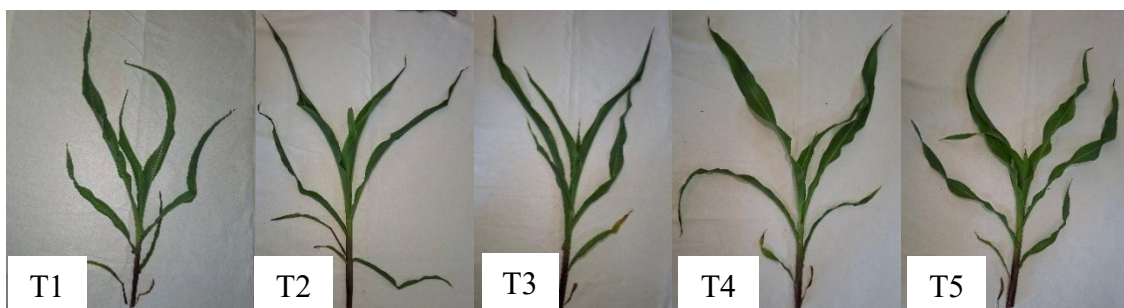


Figura 11. Parte aérea de plantas de milho com 30 dias após a germinação submetidas aos tratamentos de adubação nitrogenada: T1 (somente água), T2 (100% ureia), T3 (80% ureia e 20% biofertilizante), T4 (60% ureia e 40% biofertilizante) e T5 (100% biofertilizante).

Os valores de HPA (Figura 12a) ficaram entre $76,10 \pm 5,68$ cm e $82,67 \pm 3,40$ cm, obtidos respectivamente pelos tratamentos T1 (controle) e T4 (60 % ureia + 40 % biofertilizante). Para DC (Figura 12b), os resultados ficaram entre $13,23 \pm 1,04$ mm e $13,83 \pm 1,10$ mm, demonstrando pouca variação entre os tratamentos. Com relação à AF (Figura 12c), observou-se por planta, médias entre $596,00 \pm 153,37$ cm² e $786,51 \pm 362,99$ cm², obtidas respectivamente pelos tratamentos T1 (controle) e T3 (80 % ureia + 20 % biofertilizante).

Com aplicação de biofertilizante de microalgas cultivadas em efluente da bovinocultura, Dagnaisser *et al.* (2024) obtiveram NF, HPA, AF e DC com valores inferiores aos obtidos com uso de ureia em cultivo de rúcula (*Eruca vesicaria*).

Na Figura 12d, observa-se que os tratamentos T1, T2 e T4 apresentaram média de 5 folhas por planta, aos 30 DAP. Já os tratamentos T3 e T5 apresentaram média de 6 folhas por planta. Dessa forma, para NF, não foi observada diferença estatística entre os tratamentos. Em cultivo de couve chinesa, Zhang *et al.* (2024) obtiveram resultados estatisticamente semelhantes para os parâmetros de NF e HPA, em tratamentos comparando biofertilizantes contendo *Chlorella* sp. e *Anabaena* sp. e fertilizantes inorgânicos e orgânicos, observando o potencial de reduzir o uso de fertilizantes minerais.

Com relação à MFPA (Figura 12e), os resultados ficaram entre $34,74 \pm 4,59$ g (T2) e $41,80 \pm 8,33$ g (T4). Já a MSPA (Figura 12f) apresentou valores entre $14,68 \pm 2,36$ g (T2) e $17,77 \pm 2,56$ g (T4). Tanto para MFPA quanto MSPA, não houve diferença estatística entre os tratamentos avaliados. Álvarez-González *et al.* (2022) não encontraram diferenças estatísticas entre a aplicação de biofertilizante de microalgas cultivadas em efluente doméstico e a adubação orgânica, ao analisaram a massa fresca e seca de plantas de manjerição.

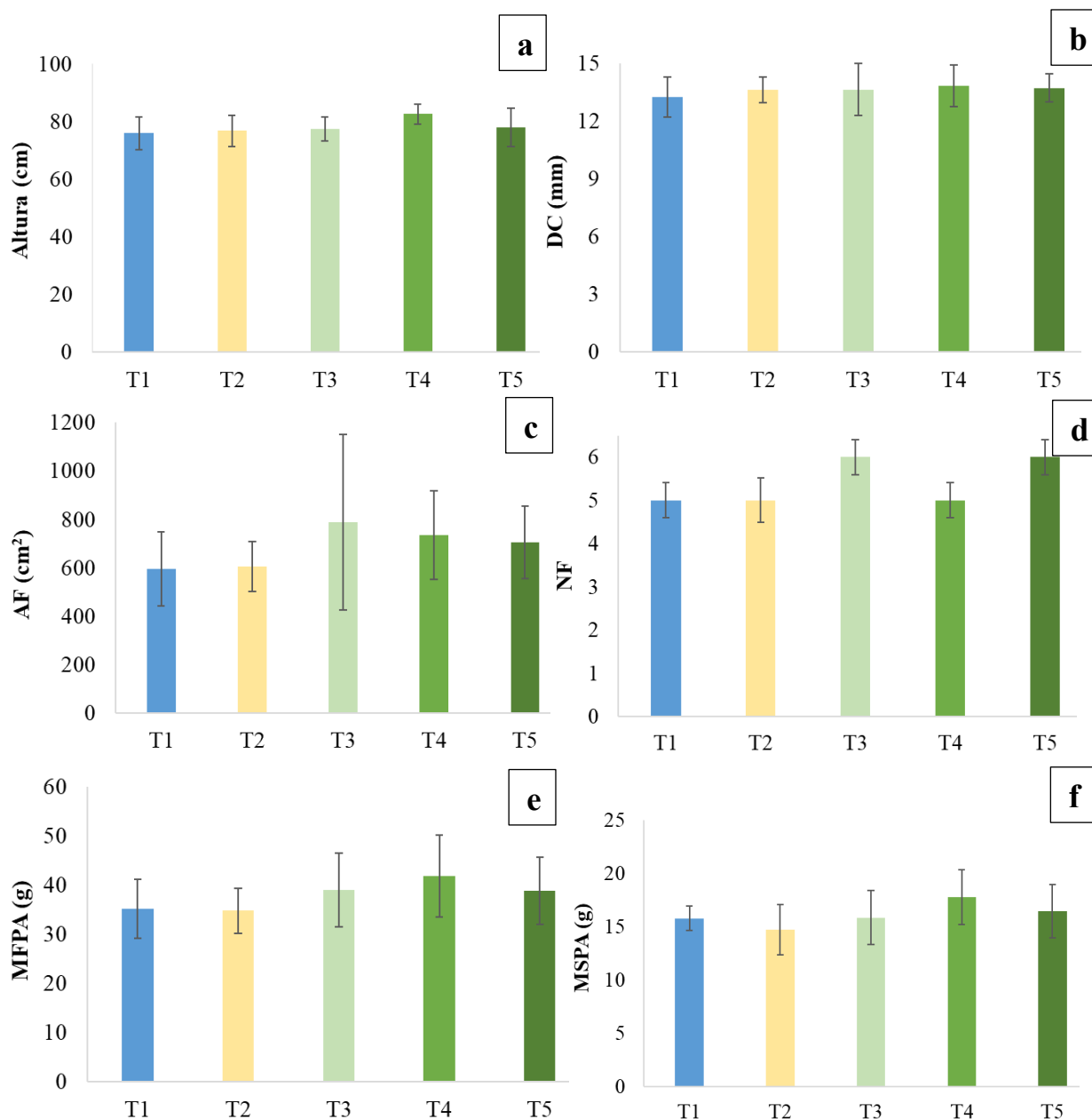


Figura 12. Parâmetros morfológicos das plantas de milho do primeiro cultivo com adubação nitrogenada sob diferentes doses de ureia e biofertilizante: T1 (somente água), T2 (100% ureia), T3 (80% ureia e 20% biofertilizante), T4 (60% ureia e 40% biofertilizante) e T5 (100% biofertilizante). DC: Diâmetro de Colmo; AF: Área Foliar; NF: Número de Folhas; MFPA: Massa Fresca da Parte Aérea; MSPA: Massa Seca da Parte Aérea.

Durante o cultivo 1, não foram observadas diferenças estatísticas entre os tratamentos

analisados, para nenhum dos parâmetros morfológicos. Esse resultado pode ser em decorrência da absorção de nutrientes da espécie estudada. A cultura do milho possui uma curva de absorção de nutrientes linear ao longo de seu ciclo, porém observa-se acúmulo de N significativo aos 44 dias após a emergência (DAE), segundo estudo de Von Pinho *et al.* (2009). No presente experimento, as plantas de milho foram analisadas aos 30 DAP, não alcançando maiores acúmulos de N. A presença de matéria orgânica no solo utilizado no experimento (27,90 g kg⁻¹, Tabela 9) também pode ter contribuído com o resultado obtido, uma vez que a matéria orgânica é fonte de nitrogênio, liberando o nutriente para as plantas conforme ocorre a mineralização desses compostos (Stevenson, 1986).

4.4.2 Cultivo 2

Com relação ao efeito residual dos tratamentos, não foram obtidas diferenças estatísticas aos 30 DAP para os parâmetros de HPA, DC, AF, NF, MFPA e MSPA. No segundo cultivo (Figura 13), a HPA, apresentada na Figura 14a, demonstrou valores entre $48,80 \pm 9,14$ cm (T1) e $59,71 \pm 6,78$ cm (T3). Estudo de Silambarasan *et al.* (2021) obteve resultado estatisticamente superior de HPA em cultivo de tomate, ao aplicar composto contendo 50% biofertilizante e 50% biofertilizante de microalgas (*Chlorella* sp. e *Scenedesmus* sp.), em comparação com aplicação apenas de NPK.



Figura 13. Plantas de milho com 30 dias após a germinação sob efeito residual dos tratamentos T1, T2, T3, T4 e T5.

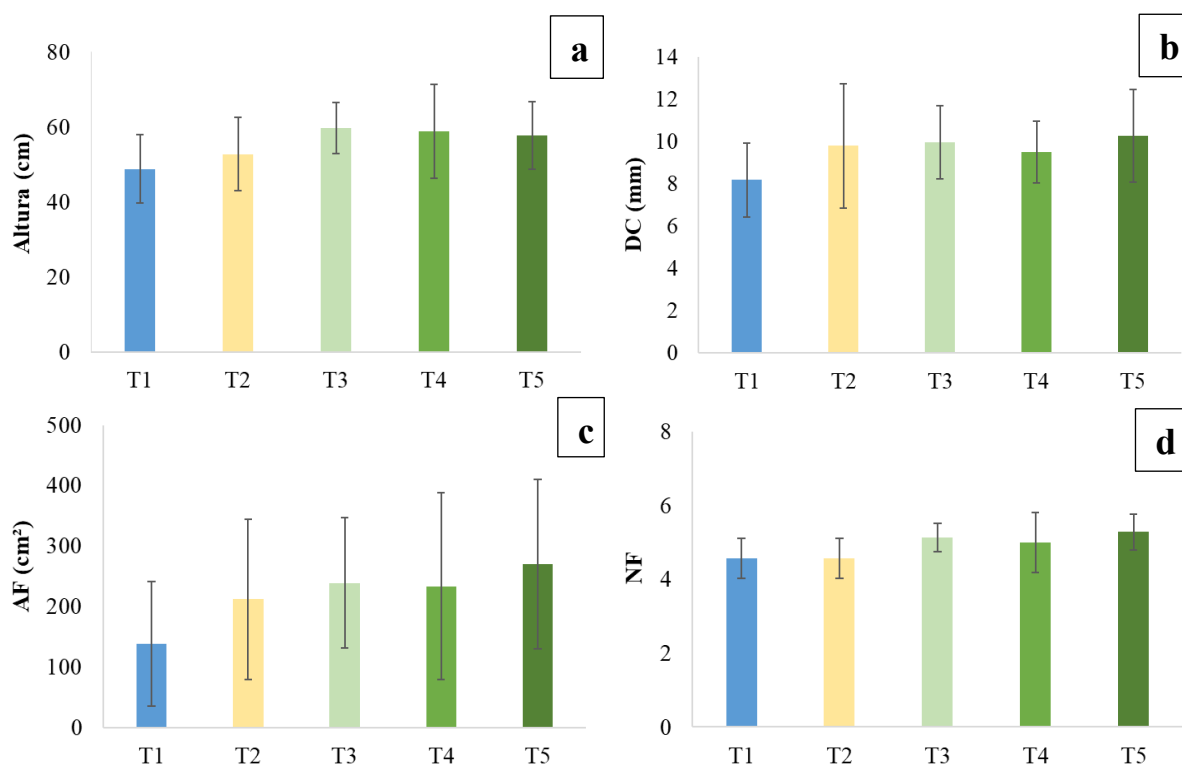
Para o DC (Figura 14b), os resultados ficaram entre $8,19 \pm 1,75$ mm (T1) e $10,27 \pm 2,20$ mm (T5). A AF (Figura 14c) apresentou médias por planta entre $138,02 \pm 102,59$ cm² (T1) e $269,66 \pm 139,81$ cm² (T5).

Na Figura 14d, observa-se que os tratamentos T3, T4 e T5 apresentaram médias entre $5,00 \pm 0,82$ e $5,29 \pm 0,49$ folhas por planta, enquanto os tratamentos T1 e T2 obtiveram ambos média de $4,57 \pm 0,53$ folhas por planta. Estudo de Deepika e MubarakAli (2020) utilizando biofertilizante de microalgas líquido em plantas de tomate também não obteve diferença estatística para o número de folhas entre o tratamento controle e os tratamentos com diferentes doses de biofertilizante.

Com relação à MFPA (Figura 14e), as médias dos tratamentos ficaram entre $9,98 \pm 5,38$ g (T1) e $17,65 \pm 7,41$ g (T5). Já para MSPA (Figura 14f), os valores foram entre $1,03 \pm 0,45$ g (T1) e $1,88 \pm 0,70$ g (T5). Em cultivo de gramíneas do gênero *Brachiaria*, Castro *et al.* (2024) observaram resultado semelhante de massa fresca e seca de plantas, ao compararem tratamentos contendo fertilizante inorgânico e biomassa de microalgas.

Não foi possível observar o efeito residual do biofertilizante aplicado, devido a ausência de diferença estatística nos atributos morfológicos analisados. Novamente, esse resultado pode ter sido decorrente à curva de absorção de nutrientes das plantas de milho (Von Pinho *et al.*, 2009), necessitando de um maior tempo de cultivo para avaliação da absorção de nitrogênio. Dessa forma, será possível avaliar a eficiência do biofertilizante produzido a partir de microalgas cultivadas em efluentes, devido ao seu potencial indicado por outros estudos como fertilizante orgânico de liberação lenta (Nayak, Swain e Sen, 2019).

Pereira *et al.* (2021), observaram que ao combinar diferentes doses de biofertilizante de microalgas e ureia, não houve diferença nas perdas por volatilização da amônia, em comparação com o uso da ureia pura. Entretanto, os autores obtiveram teores de nitrogênio mais elevados nas plantas de milho tratadas com a combinação de 24,55% de biofertilizante e 75,45% de ureia, indicando melhor absorção pelas plantas.



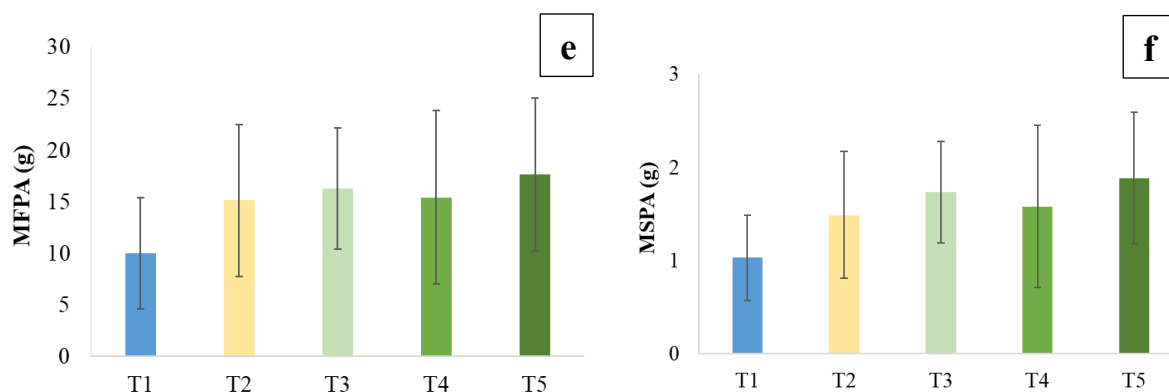


Figura 14. Parâmetros morfológicos das plantas de milho do segundo cultivo. DC: Diâmetro de colmo; AF: Área Foliar; NF: Número de folhas; MFPA: Massa Fresca da Parte Aérea; MSPA: Massa Seca da Parte Aérea.

Nota-se que as médias dos tratamentos do cultivo 2 foram inferiores em todos os parâmetros analisados em comparação com o cultivo 1, demonstrando a necessidade de reposição de nutrientes no solo a cada ciclo, principalmente no cultivo do milho, uma vez que essa cultura é considerada altamente consumidora de nutrientes ao longo do tempo (Meena *et al.*, 2013). Verificou-se ainda que a inexistência de diferença significativa entre os tratamentos no primeiro cultivo não foi provocada pela indisponibilidade do nitrogênio orgânico da biomassa de microalgas que necessitaria de uma maior tempo para sua mineralização. Aliado a isso, o baixo valor da dose indicada para o estágio da cultura estudada e o seu uso pelas plantas no primeiro cultivo, contribuíram para os resultados obtidos no segundo cultivo.

3.5 CONCLUSÃO

O biofertilizante de microalgas produzido em ARBB contém nutrientes necessários ao desenvolvimento das plantas, principalmente com relação aos teores de nitrogênio e fósforo, e quando submetidos a um processo de concentração da biomassa. Tais nutrientes promoveram maiores valores das variáveis morfológicas do milho aos 30 DAP em tratamentos que receberam um percentual do biofertilizante como fonte de nitrogênio em ambos os cultivos realizados, embora não se tenha obtido diferença estatística entre os tratamentos. Adicionalmente, supõem-se que experimentos com cultivo do milho utilizando tempo superior a 45 dias poderá trazer resultados mais conclusivos.

3.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAY, K. A. et al. Fertilizer, soil health, and economic shocks: A synthesis of recent evidence. **Food Policy**, v. 133, p. 102892, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2025.102892>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306919225000971>. Acesso em: 02 jan. 2026.

ALLEN, R. G. et al. *Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 1998. (FAO Irrigation and Drainage Paper, n. 56). Disponível em: <https://www.fao.org/3/X0490E/X0490E00.htm>. Acesso em: 02 jan. 2026.

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>. Disponível em: https://www.schweizerbart.de/papers/metz/detail/22/82078/Koppen_s_climate_classification_map_for_Brazil?af=crossref. Acesso em: 02 jan. 2026.

ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, A. et al. Can microalgae grown in wastewater reduce the use of inorganic fertilizers? **Journal of Environmental Management**, v. 323, p. 116224, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116224>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479722017972?via%3Dihub>. Acesso em: 02 jan. 2026.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 23a ed. Washington, DC: American Public Health Association, 2017. ISBN: 978-0875532875.

BAGASTYO, A. Y. et al. Electrodialytic removal of fluoride and calcium ions to recover phosphate from fertilizer industry wastewater. **Sustainable Environment Research**, v. 27, n. 5, p. 230-237, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.serj.2017.06.002>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468203917300390?via%3Dihub>. Acesso em: 02 jan. 2026.

BELTRÁN-ROCHA, J. C. et al. Effect of natural increase of pH and microalgae cyclical recultivation on biomass production and polishing of municipal secondary effluent. **Desalination and Water Treatment**, v. 317, p. 100103, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100103>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1944398624001243?via%3Dihub>. Acesso em: 02 jan. 2026.

BOUDIOMBO, J. S. B et al. State of the art and prospects of zeolites and metal organic frameworks (MOFs) for nitrogen and phosphorus removal in dairy wastewater. **Chemosphere**, v. 329, p. 138531, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138531>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653523007981?via%3Dihub>. Acesso em: 19 ago. 2024.

BOUWER, H.; CHANEY, R. L. Land treatment of wastewater. **Advances in agronomy**, v. 26, p. 133-176, 1974. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60870-6](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60870-6). Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0065211308608706>. Acesso em: 02 jan. 2026.

BRASIL. *Estudos Estratégicos: Fertilizantes (v. 10)*. Brasília: Governo do Brasil / Secretaria de Assuntos Estratégicos da Presidência da República, 2020. Disponível em: https://www.gov.br/planalto/pt-br/assuntos/assuntos-estrategicos/documentos/estudos-estrategicos/sae_publicacao_fertilizantes_v10.pdf. Acesso em: 06 out. 2025.

BRASIL. Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB). *Boletim logístico*. Ano VIII, dezembro 2025. Brasília, DF: CONAB, 2025. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/>. Acesso em: 23 dez. 2025.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. Secretaria de Comércio e Relações Internacionais. *Exportações brasileiras: milho*. Brasília: MAPA, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/relacoes-internacionais/documentos/Milho.pdf>. Acesso em: 28 dez. 2025.

CARVALHO, D. F. et al. Avaliação de evapotranspiração de referência na região de Seropédica-RJ utilizando lisímetro de pesagem. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 14, n. 1, p. 97-105, 2006.

CASTRO, I. M. P. et al. The effects of microalgae use as a biofertilizer on soil and plant before and after its anaerobic (co-) digestion with food waste. **Science of the Total Environment**, v. 934, p. 173301, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173301>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S004896972403448X?via%3Dihub>. Acesso em: 02 jan. 2026.

CHU, Y. et al. Integration of dairy manure wastewater treatment and biofuel production by microalgae-bacteria consortia in a biofilm reactor. **Algal Research**, v. 86, p. 103912, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2025.103912>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2211926425000219?via%3Dihub>. Acesso em: 02 jan. 2026.

CORNET, J. et al. Reworking subducted sediments in arc magmas and the isotopic diversity of the continental crust: The case of the Ordovician Famatinian crustal section, Argentina. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 595, p. 117706, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2022.117706>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012821X22003429>. Acesso em: 02 jan. 2026.

DAGNAISSER, L. S. et al. Microalgae cultivated in cattle wastewater as a biofertilizer: tests on the production of arugula (*Eruca Vesicaria*) and the benefits for sustainable agriculture. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 235, n. 11, p. 740, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11270-024-07519-1>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11270-024-07519-1>. Acesso em: 02 jan. 2026.

DEEPIKA, P.; MUBARAKALI, D. Production and assessment of microalgal liquid fertilizer for the enhanced growth of four crop plants. **Biocatalysis and agricultural biotechnology**, v. 28, p. 101701, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101701>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1878818120307210>. Acesso em: 02 jan. 2026.

FERREIRA, A. et al. From piggery wastewater to wheat using microalgae towards zero waste. **Algal Research**, v. 72, p. 103153, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2023.103153>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2211926423001868?via%3Dihub>. Acesso em: 02 jan. 2026.

FERREYRA-SUAREZ, D.; GARCÍA-DEPRAECT, O.; CASTRO-MUÑOZ, R. A review on fungal-based biopesticides and biofertilizers production. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 283, p. 116945, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116945>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0147651324010212?via%3Dihub>. Acesso em: 02 jan. 2026.

FREIRE, L. R. et al. (org.). *Manual de calagem e adubação do Estado do Rio de Janeiro*. Brasília, DF: Embrapa; Seropédica, RJ: Editora Universidade Rural, 2013. 430 p. ISBN 978-85-7035-182-1.

GOSWAMI, R. K.; MEHARIYA, S.; VERMA, P. Municipal wastewater treatment using an innovative two-stage sequential microalgal co-cultivation system with different hydraulic retention time: a sustainable approach to circular economy. **Process Biochemistry**, v. 147, p. 448-464, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2024.10.011>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359511324003465>. Acesso em: 17 jan. 2026.

HUANG, F. et al. Mg²⁺ addition: Unlocking optimized treatment performance and anti-fouling property in microalgal-bacterial membrane bioreactors. **Science of The Total Environment**, v. 920, p. 171124, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171124>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969724012634>. Acesso em: 17 jan. 2026.

JALLOULI, W. et al. Review on biopesticide production by *Bacillus thuringiensis* subsp. *kurstaki* since 1990: Focus on bioprocess parameters. **Process Biochemistry**, v. 98, p. 224-232, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2020.07.023>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359511320303871?via%3Dihub>. Acesso em: 02 jan. 2026.

MAGYAR, T. et al. Improvement of N and P ratio for enhanced biomass productivity and sustainable cultivation of *Chlorella vulgaris* microalgae. **Heliyon**, v. 10, n. 1, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e23238>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844023104464>. Acesso em: 02 jan. 2026.

MATOS, A. T.; MATOS, M. P. *Disposição de águas residuárias no solo e em sistemas alagados construídos*. Viçosa, MG: Ed. UFV, 2017. 371p. ISBN: 9788572695732.

MEENA, B. P. et al. Effect of sources and levels of nutrients on growth and yield behaviour of pop corn (*Zea mays*) and potato (*Solanum tuberosum*) sequence. **Indian journal of Agronomy**, v. 58, n. 4, p. 474-479, 2013. DOI: <https://doi.org/10.59797/ija.v58i4.4253>. Disponível em: <https://pub.isa-india.in/index.php/ija/article/view/4253>. Acesso em: 02 jan. 2026.

MENDONÇA, H. V.; OMETTO, J. P. H. B.; OTENIO, M. H. Production of energy and biofertilizer from cattle wastewater in farms with intensive cattle breeding. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 228, p. 1-14, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11270-017-3264-1>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11270-017-3264-1>. Acesso em: 19 ago. 2024.

MENDONÇA, H. V. et al. Biofuel recovery from microalgae biomass grown in dairy wastewater treated with activated sludge: The next step in sustainable production. **Science of The Total Environment**, v. 824, p. 153838, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153838>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969722009305>. Acesso em: 02 jan. 2026.

MESA, A. P. et al. Feasibility of nitrogen and phosphorus removal from treated wastewater using microalgae and potential microalgae use as biofertilizer. **Journal of Water Process Engineering**, v. 70, p. 107023, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.107023>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214714425000959?via%3Dihub>. Acesso em: 02 jan. 2026.

MORENO-CRUZ, C. F. et al. Livestock wastewater as a microalgae growth medium for potential production of biodiesel in arid areas of Mexico. **Algal Research**, v. 86, p. 103957, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2025.103957>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2211926425000669?via%3Dihub>. Acesso em: 02 jan. 2026.

MUKHERJEE, C. et al. Parboiled rice effluent: A wastewater niche for microalgae and cyanobacteria with growth coupled to comprehensive remediation and phosphorus biofertilization. **Algal research**, v. 19, p. 225-236, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.algal.2016.09.009>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2211926416303460?via%3Dihub>. Acesso em: 02 jan. 2026.

NAYAK, M.; SWAIN, D. K.; SEN, R. Strategic valorization of de-oiled microalgal biomass waste as biofertilizer for sustainable and improved agriculture of rice (*Oryza sativa* L.) crop. **Science of the Total Environment**, v. 682, p. 475-484, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.123>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969719321485?via%3Dihub>. Acesso em: 02 jan. 2026.

NIE, J. et al. Bioremediation of water containing pesticides by microalgae: Mechanisms, methods, and prospects for future research. **Science of the Total Environment**, v. 707, p. 136080, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136080>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969719360760>. Acesso em: 02 jan. 2026.

PEREIRA, A. S. A. P. et al. Organomineral fertilizers pastilles from microalgae grown in wastewater: Ammonia volatilization and plant growth. **Science of The Total Environment**, v. 779, p. 146205, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146205>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969721012729>. Acesso em: 02 jan. 2026.

PINEDA, D. D. et al. Integrated approach for wastewater remediation and biofertilizer

development using *Chlorella vulgaris* in raceway ponds. **Algal Research**, v. 88, p. 104022, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2025.104022>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2211926425001316?via%3Dihub>. Acesso em: 02 jan. 2026.

POURBABAEE, A. A. et al. Potential application of selected sulfur-oxidizing bacteria and different sources of sulfur in plant growth promotion under different moisture conditions. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 51, n. 6, p. 735-745, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1080/00103624.2020.1729377>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00103624.2020.1729377>. Acesso em: 02 jan. 2026.

PRIYA, A. K. et al. Heavy metal remediation from wastewater using microalgae: Recent advances and future trends. **Chemosphere**, v. 305, p. 135375, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135375>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653522018689>. Acesso em: 02 jan. 2026.

R CORE TEAM (2024). *_R: A Language and Environment for Statistical Computing_*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 23 dez. 2025.

RAHMAN, A. et al. A critical review of the microalgae and cyanobacteria-based biofertilizers: An insight into the cost effectiveness of different algae cultivation strategies. **Environmental Technology & Innovation**, v. 40, p. 104480, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2025.104480>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352186425004663?via%3Dihub>. Acesso em: 02 jan. 2026.

REMPEL, A. et al. Microalgae growth using treated domestic effluent added to emerging pollutants: Removal mechanism and generation of by products. **Journal of Water Process Engineering**, v. 55, p. 104175, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104175>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214714423006955?via%3Dihub>. Acesso em: 02 jan. 2026.

SALA, A. et al. Scanning agro-industrial wastes as substrates for fungal biopesticide production: Use of *Beauveria bassiana* and *Trichoderma harzianum* in solid-state fermentation. **Journal of Environmental Management**, v. 295, p. 113113, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113113>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479721011750?via%3Dihub>. Acesso em: 02 jan. 2026.

SANT'ANNA, C. L. et al. *Atlas de cianobactérias e microalgas de águas continentais brasileiras*. São Paulo, Instituto de Botânica, Núcleo de Pesquisa em Ficologia, 2012. ISBN: 978-85-7523-040-4. Disponível em: www.ibot.sp.gov.br. Acesso em: 15 jul. 2025.

SANTANA, J. et al. Cultivation of *Chlorella* sp. in Photobioreactors: Potential for Bioremediation of Synthetic Soy Milk Effluents and Biofuel Production. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, p. 117996, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.117996>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2213343725026922?via%3Dihub>. Acesso em: 02 jan. 2026.

SANTOS, H.G. et al. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. 5. ed. Brasília: Embrapa, 356 p., 2018. ISBN: 978-85-7035-817-2.

SANTOS, M. G. B. et al. Microalgae biomass production for biofuels in Brazilian scenario: a critical review. **BioEnergy Research**, v. 14, n. 1, p. 23-42, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12155-020-10180-1>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12155-020-10180-1>. Acesso em: 02 jan. 2026.

SILAMBARASAN, S. et al. Removal of nutrients from domestic wastewater by microalgae coupled to lipid augmentation for biodiesel production and influence of deoiled algal biomass as biofertilizer for *Solanum lycopersicum* cultivation. **Chemosphere**, v. 268, p. 129323, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129323>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653520335207?via%3Dihub>. Acesso em: 02 jan. 2026.

SILVA, L. O. et al. Treated cattle wastewater affects the growth, quality and water productivity of *Dalbergia nigra* seedlings produced with shading and irrigation levels. **Scientia Agricola**, v. 81, p. e20230058, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2023-0058>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/sa/a/fpjLc8McVHqXDLjXMrZPCYn/?lang=en>. Acesso em: 12 mar. 2026.

STEVENSON, F. J. *Cycles of soil - carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients*. New York: John Wiley & Sons, 1986. 380 p.

SON, D. J. et al. Removal of nitrogen and phosphate from fertilizer industry wastewater by magnesium ammonium phosphate formation and electrochemical treatment. **International Journal of Electrochemical Science**, v. 14, n. 4, p. 3153-3167, 2019. DOI: <https://doi.org/10.20964/2019.04.45>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1452398123019260>. Acesso em: 02 jan. 2026.

SOUZA, A. P.; LIMA, M. E.; CARVALHO, D. F. Evapotranspiração e coeficientes de cultura do milho em monocultivo e em consórcio com a mucuna-cinza, usando lisímetros de pesagem. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 7, n. 1, p. 142-149, 2012. DOI: <https://doi.org/10.5039/agraria.v7i1a802>. Disponível em: <http://www.agraria.pro.br/ojs32/index.php/RBCA/article/view/v7i1a802>. Acesso em: 02 jan. 2026.

SOUZA, D. S. et al. Use of the cyanobacterium *Spirulina platensis* in cattle wastewater bioremediation. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 44, p. e58806-e58806, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.4025/actascitechnol.v44i1.58806>. Disponível em: <https://periodicos.uem.br/actascitechnol/index.php/ActaSciTechnol/article/view/58806>. Acesso em: 19 ago. 2024.

SPERLING, M. V. *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. Vol. 1*. 4. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental/UFMG, 2007. ISBN: 9788542300536.

SUCHITHRA, M. R. et al. Effectiveness of green microalgae as biostimulants and

biofertilizer through foliar spray and soil drench method for tomato cultivation. **South African Journal of Botany**, p. 740-750, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2021.12.022>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S025462992100541X?via%3Dihub>. Acesso em: 02 jan. 2026.

TEIXEIRA, P.C. et al. *Manual de Métodos de Análise de Solo*. 3.ed. Brasília: Embrapa; 2017. 575p. ISBN: 978-85-7035-771-7.

VINOTHKUMAR, V. et al. Rice straw biostimulants: Phytochemicals and effects on maize growth and tomato yield. 2025. DOI: <https://doi.org/10.14719/pst.5111>. Disponível em: <https://horizonpublishing.com/journals/index.php/PST/article/view/5111>. Acesso em: 02 jan. 2026.

VON PINHO, R. G. et al. Marcha de absorção de macronutrientes e acúmulo de matéria seca em milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 8, n. 02, 2009. DOI: <https://doi.org/10.18512/1980-6477/rbms.v8n02p%25p>. Disponível em: <https://rbms.sede.embrapa.br/ojs/article/view/278>. Acesso em: 02 jan. 2026.

WORKU, A. K. et al. Recent Advances in Wastewater Treatment Technologies: Innovations and New Insights. **Energy Reviews**, p. 100164, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enrev.2025.100164>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772970225000355>. Acesso em: 02 jan. 2026.

YUAN, Z. et al. Microalgae self-selected indigenous aerobic denitrifying bacteria drive pollutants and antibiotic resistance genes removal in swine wastewater: Insights into the efficiency and mechanism. **Journal of Water Process Engineering**, v. 77, p. 108504, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.108504>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214714425015776>. Acesso em: 16 jan. 2026.

ZHANG, Z. et al. Using microalgae to reduce the use of conventional fertilizers in hydroponics and soil-based cultivation. **Science of the Total Environment**, v. 912, p. 169424, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169424>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969723080543?via%3Dihub>. Acesso em: 02 jan. 2026.

4 CONCLUSÕES

O tratamento biológico com mix de microalgas foi eficiente para a remoção de poluentes presentes em ARBB, com destaque para a redução das concentrações de NT, NA e DQO, com eficiências de remoção acima de 98%. Observou-se nas soluções contendo ARBB + microalgas a presença de fitormônios das classes Giberelina, Citocinina, Auxina e Ácido abscísico, que possuem atuação positiva como bioestimulantes.

Os tratamentos contendo solução de microalgas e ácido giberélico não interferiram na porcentagem de germinação nem do IVG das sementes de milho. Porém, com relação aos parâmetros morfológicos avaliados, houve aumento significativo na altura da parte aérea com aplicação do ácido giberélico, seguido pelos tratamentos com microalgas, que apresentaram resultado estatisticamente superior ao controle. Na massa fresca e seca da parte aérea, os maiores valores foram obtidos similarmente pelos tratamentos com ácido giberélico e com a solução S1 (ARBB + microalgas). Para comprimento radicular e massa fresca e seca de raízes, não houve diferença estatística entre os tratamentos avaliados.

As microalgas cultivadas em ARBB contêm nutrientes necessários ao desenvolvimento das plantas, principalmente NT. Nas avaliações de desenvolvimento inicial do milho utilizando a adubação nitrogenada com ureia (100% da dose), combinações de ureia + biofertilizante e biofertilizante (100% da dose), não houve diferença estatística para nenhum dos parâmetros morfológicos, inclusive com relação ao tratamento controle (sem adubação nitrogenada), o que pode ser explicado pela absorção de N não ser tão significativa aos 30 DAP no cultivo de milho híbrido, em comparação com o acúmulo total de N no ciclo completo da cultura.

Os bioinsumos advindos de microalgas possuem potencial agrônomo. A atividade bioestimulante observada, assim como a presença de nutrientes relevantes e de fitormônios, demonstra a contribuição do tratamento de efluentes e da destinação de resíduos para a economia circular, diminuindo o uso de fertilizantes inorgânicos e reduzindo a liberação de poluentes no meio ambiente.

5 RECOMENDAÇÕES DE PESQUISA

Recomenda-se a reprodução do experimento para análise dos efeitos bioestimulantes dos compostos à base de microalgas em culturas que apresentem percentual de germinação reduzido, bem como avaliação de diferentes tipos de aplicação dessas soluções em sementes. Também é necessário compreender se existem compostos com potencial de fitotoxicidade nas soluções contendo efluentes biorremediados e biomassa de microalgas.

Com relação ao uso das microalgas como biofertilizantes, recomenda-se a replicação do estudo em campo, permitindo a avaliação da produtividade do milho ao final do ciclo completo com uso de biofertilizantes à base de microalgas. Além disso, a realização de cultivos sucessivos ao longo do tempo, com a aplicação dos biofertilizantes permitirá a análise do comportamento desses compostos no solo, com relação à interação com os microrganismos presentes no solo, à possível melhoria da fertilidade e seu potencial como fertilizante de liberação lenta.

São necessários estudos para a constatação da viabilidade econômica em diferentes escalas de cultivo e produção dos bioestimulantes e biofertilizantes, podendo beneficiar, dessa forma, produtores agrícolas diversos.

6 REFERÊNCIAS

- ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, A. et al. Exploring the biostimulant potential of *Scenedesmus* sp. grown in wastewater: impacts on plant growth and photosynthetic activity of lettuce. **Chemosphere**, v. 382, p. 144494, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2025.144494>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653525004382?via%3Dihub>. Acesso em: 29 dez. 2025.
- BHANDARI, V. M.; SOROKHAIBAM, L. G.; RANADE, V. V. Industrial wastewater treatment for fertilizer industry—A case study. **Desalination and Water Treatment**, v. 57, n. 57, p. 27934-27944, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/19443994.2016.1186399>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1944398624035859?via%3Dihub>. Acesso em: 29 dez. 2025.
- CASTRO, I. M. P. et al. The effects of microalgae use as a biofertilizer on soil and plant before and after its anaerobic (co-) digestion with food waste. **Science of The Total Environment**, v. 934, p. 173301, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173301>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S004896972403448X>. Acesso em: 02 jan. 2026.
- GILL, J. M. et al. Optimizing aquaculture sustainability: Microalgae-based co-culture systems for aquaculture wastewater treatment and pollution reduction. **Algal Research**, p. 104430, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2025.104430>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2211926425005417?via%3Dihub>. Acesso em: 29 dez. 2025.
- HAMROUNI, R. et al. Current status and future trends of microbial and nematode-based biopesticides for biocontrol of crop pathogens. **Critical Reviews in Biotechnology**, v. 45, n. 2, p. 333-352, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1080/07388551.2024.2370370>. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38987982/>. Acesso em: 02 jan. 2026.
- JOSE, S. et al. Cyanobacteria-green microalgae consortia enhance soil fertility and plant growth by shaping the native soil microbiome of *Capsicum annuum*. **Rhizosphere**, v. 30, p. 100892, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2024.100892>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452219824000454>. Acesso em: 13 out. 2025.
- KUMAR, N.; KUMAR, D.; MISHRA, A. Microbe-Driven Valorisation of Bio-Waste for Biofertilizer Production: A Comprehensive Review. **Sustainable Chemistry for Climate Action**, p. 100158, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scca.2025.100158>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772826925001038?via%3Dihub>. Acesso em: 29 dez. 2025.
- LAKSHMIKANDAN, M. et al. Enhancing nutrient removal of agricultural and agro-industrial wastewater utilizing symbiotic microalgal co-cultivation systems to optimize sustainable resource recovery. **Journal of Water Process Engineering**, v. 63, p. 105524, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105524>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214714424007566?via%3Dihub>. Acesso em: 29 dez. 2025.

MANNING, D. A. C. et al. The true carbon costs of supplying potassium fertilizer to Brazilian agriculture. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 226, p. 108694, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2025.108694>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344925005713?via%3Dihub>. Acesso em: 29 dez. 2025.

NSENGIMANA, V. et al. Impact of chemical fertilizers on diversity and abundance of soil-litter arthropod communities in coffee and banana plantations in southern Rwanda. **Current Research in Environmental Sustainability**, v. 5, p. 100215, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.crsust.2023.100215>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666049023000087>. Acesso em: 13 out. 2025.

NUR, M. M. A. et al. Innovative strategies for utilizing microalgae as dual-purpose biofertilizers and phycoremediators in agroecosystems. **Biotechnology Reports**, p. e00870, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.btre.2024.e00870>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2215017X24000432>. Acesso em: 13 out. 2025.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS, Population Division. *World Population Prospects 2022: Summary of Results*. United Nations, Nova Iorque, n. 3, p. 1-52, 2022. Disponível em: https://www.un.org/development/desa/pd/sites/www.un.org.development.desa.pd/files/wpp2022_summary_of_results.pdf. Acesso em: 18 ago. 2024.

RAY, A. et al. Potassium-phosphorus-sulfur augmented biochar production from potentially toxic elements abated gypsum pond wastewater of phosphate fertilizer industry. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 11, n. 5, p. 110404, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110404>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2213343723011430?via%3Dihub>. Acesso em: 29 dez. 2025.

RIBEIRO, D. M. et al. Characterization of different microalgae cultivated in open ponds. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 41, p. e37723, 2019. DOI: <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v41i1.37723>. Disponível em: <https://periodicos.uem.br/actascitechnol/index.php/ActaSciTechnol/article/view/37723>. Acesso em: 19 ago. 2024.

ROTILI, D. H. et al. Medium-term fertilization strategies on extensive grain cropping systems under water table influence. **Agricultural Systems**, v. 210, p. 103715, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2023.103715>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0308521X23001208?via%3Dihub>. Acesso em: 29 dez. 2025.

RUALES, E. et al. Microalgae-based biorefinery for biostimulant and biogas production: An integrated approach for resource recovery. **Algal Research**, p. 104323, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2025.104323>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211926425004345?via%3Dihub>. Acesso em: 29 dez. 2025.

PÉREZ-CID, B. et al. Efficient removal of copper-based biopesticides from potential

agricultural wastewaters by alginate-based biocomposites. **Biomass and Bioenergy**, v. 206, p. 108679, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.108679>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953425010906?via%3Dihub>. Acesso em: 29 dez. 2025.

SHAO, Y. et al. Evaluating the Sustainability of Wheat–Maize System with a Long-Term Fertilization Experiment. **Agronomy**, v. 15, n. 1, p. 210, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy15010210>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4395/15/1/210>. Acesso em: 29 dez. 2025.

SHAYESTEH, H. et al. Nitrogen dynamics and biological processes in soil amended with microalgae grown in abattoir digestate to recover nutrients. **Journal of Environmental Management**, v. 344, p. 118467, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118467>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479723012550>. Acesso em: 15 out. 2025.

SINGH, A. A review of wastewater irrigation: Environmental implications. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 168, p. 105454, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105454>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921344921000616?via%3Dihub>. Acesso em: 17 jul. 2024.

SUPRAJA, K. V.; BEHERA, B.; BALASUBRAMANIAN, P. Efficacy of microalgal extracts as biostimulants through seed treatment and foliar spray for tomato cultivation. **Industrial crops and products**, v. 151, p. 112453, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112453>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926669020303691?via%3Dihub>. Acesso em: 29 dez. 2025.

UNITED STATES. Department of Agriculture. *Grain and feed update: Brazil*. Brasília: Foreign Agricultural Service, 17 dez. 2025. Relatório n. BR2025-0051. Disponível em: https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Grain%20and%20Feed%20Update_Brasilia_Brazil_BR2025-0051.pdf. Acesso em: 29 dez. 2025.

WANG, L. et al. Effects of different fertilizer applications on nitrogen leaching losses and the response in soil microbial community structure. **Environmental Technology & Innovation**, v. 23, p. 101608, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101608>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235218642100256X?via%3Dihub>. Acesso em: 16 jan. 2026.

WANG, Y. et al. Review on application of algae-based biochars in environmental remediation: Progress, challenge and perspectives. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 11, n. 6, p. 111263, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.111263>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221334372302002X>. Acesso em: 15 out. 2025.