

INSTITUTO FEDERAL GOIANO – CAMPUS CERES
BACHARELADO EM AGRONOMIA
RICHARD ALEXANDRE LIBERIO DA SILVA

BIOINSUMOS E INTENSIDADE LUMINOSA NO CULTIVO DE ALFACE
(*LACTUCA SATIVA* L.) EM AMBIENTE *INDOOR*

CERES – GO
2025

RICHARD ALEXANDRE LIBERIO DA SILVA

**BIOINSUMOS E INTENSIDADE LUMINOSA NO CULTIVO DE ALFACE
(*LACTUCA SATIVA* L.) EM AMBIENTE *INDOOR***

Trabalho de curso apresentado ao curso de Agronomia do Instituto Federal Goiano – Campus Ceres, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Agronomia, sob orientação do Prof. Dr. Henrique Fonseca Elias de Oliveira e coorientação da Prof^a. Dr^a. Priscila Jane Romano Gonçalves Selari.

**CERES – GO
2025**

**Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema Integrado de Bibliotecas do IF Goiano - SIBi**

S586 Silva, Richard Alexandre Liberio da
BIOINSUMOS E INTENSIDADE LUMINOSA NO CULTIVO DE
ALFACE (LACTUCA SATIVA L.) EM AMBIENTE INDOOR /
Richard Alexandre Liberio da Silva. Ceres, Go 2025.
64f. il.
Orientador: Prof. Dr. Henrique Fonseca Elias de Oliveira.
Coorientadora: Prof^a. Dra. Priscila Jane Romano Gonçalves
Selari.
Tcc (Bacharel) - Instituto Federal Goiano, curso de 0320021 -
Bacharelado em Agronomia - Ceres (Campus Ceres).
1. Agricultura sustentável. 2. Perfil metabólico. 3. Teor
nutricional. 4. Células viáveis. I. Título.

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

<input type="checkbox"/> Tese (doutorado)	<input type="checkbox"/> Artigo científico
<input type="checkbox"/> Dissertação (mestrado)	<input type="checkbox"/> Capítulo de livro
<input type="checkbox"/> Monografia (especialização)	<input type="checkbox"/> Livro
<input checked="" type="checkbox"/> TCC (graduação)	<input type="checkbox"/> Trabalho apresentado em evento
<input type="checkbox"/> Produto técnico e educacional - Tipo: <input type="text"/>	
Nome completo do autor: <input type="text" value="Richard Alexandre Liberio da Silva"/>	Matrícula: <input type="text" value="2021103200240081"/>
Título do trabalho: <input type="text" value="Bioinsumos e intensidade luminosa no cultivo de alface (<i>Lactuca sativa</i> L.) em ambiente indoor"/>	

RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial: ☒ Não ☐ Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: /

O documento está sujeito a registro de patente? ☐ Sim ☒ Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? ☐ Sim ☒ Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O(a) referido(a) autor(a) declara:

- Que o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- Que obteve autorização de quaisquer materiais incluídos no documento do qual não detém os direitos de autoria, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- Que cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Documentos assinado digitalmente


RICHARD ALEXANDRE LIBERIO DA SILVA
Data: 05/12/2025 05:55:22 -0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

/
Local Data

Assinatura do autor e/ou detentor dos direitos autorais

Ciente e de acordo:

Assinatura do(a) orientador(a)

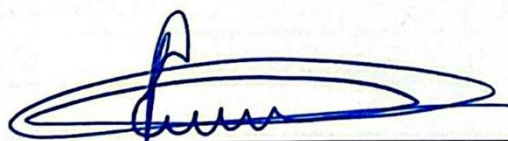

HENRIQUE FONSECA ELIAS DE OLIVEIRA
Data: 05/12/2025 18:38:57 -0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

ANEXO IV - ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CURSO

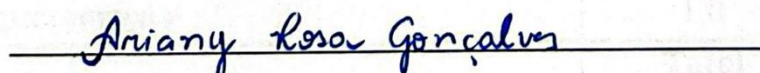
Ao(s) 26 dia(s) do mês de novembro do ano de dois mil e 25, realizou-se a defesa de Trabalho de Curso do(a) acadêmico(a) Richard Alexandre Libério da Silva, do Curso de Bacharelado em Agronomia, matrícula 2021103200240081, cujo título é "Bioinsumos e Intensidade luminosa no Cultivo de Alface (Lactuca Sativa L.) em ambiente indoor". A defesa iniciou-se às 08 horas e 02 minutos, finalizando-se às 10 horas e 45 minutos. A banca examinadora considerou o trabalho Aprovado com média 8,4 no trabalho escrito, média 9,7 no trabalho oral, apresentando assim média aritmética final 9,0 de pontos, estando o(a) estudante Apto para fins de conclusão do Trabalho de Curso.

Após atender às considerações da banca e respeitando o prazo disposto em calendário acadêmico, o(a) estudante deverá fazer a submissão da versão corrigida em formato digital (.pdf) no Repositório Institucional do IF Goiano – RIIF, acompanhado do Termo Ciência e Autorização Eletrônico (TCAE), devidamente assinado pelo autor e orientador.

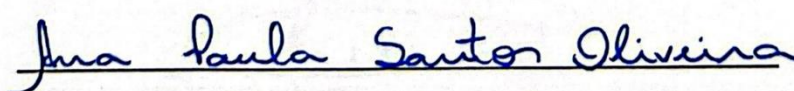
Os integrantes da banca examinadora assinam a presente.



Assinatura Presidente da Banca



Assinatura Membro 1 Banca Examinadora



Assinatura Membro 2 Banca Examinadora

Dedico este trabalho aos meus pais, que me ensinaram o valor do esforço e da honestidade; a todos os professores e amigos que estiveram presentes em cada etapa, onde compartilharam comigo conhecimentos, desafios e conquistas, tornando esta trajetória uma experiência de crescimento pessoal e profissional.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela força e sabedoria concedida durante toda esta jornada acadêmica, pois esta conquista não é apenas minha, mas também de todos que estiveram ao meu lado nesta caminhada.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, em especial ao Campus Ceres, presente em toda a minha formação, desde o Ensino Médio (Curso Técnico Integrado em Meio Ambiente) até a graduação.

Ao Centro de Excelência em Bioinsumos (CEBIO), pela colaboração à pesquisa, sendo de suma importância para o desenvolvimento das atividades experimentais e para o aprimoramento do conhecimento científico.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG), pela bolsa de pesquisa concedida nº 41.016.094 CEBIO, sendo de grande importância para a realização deste estudo.

Ao meu orientador, Dr. Henrique Fonseca Elias de Oliveira, pela disponibilidade, atenção e acompanhamento durante toda a fase desta pesquisa, oferecendo valiosas contribuições para o aprimoramento e conclusão desta pesquisa e jornada acadêmica. À Dra. Priscila Jane Romano Gonçalves Selari, pela orientação, ensinamentos transmitidos e pela confiança depositada ao longo dos três anos em que trabalhamos juntos em prol da pesquisa científica (IC). Sua orientação foi essencial para o meu crescimento científico e profissional, contribuindo de maneira significativa para a consolidação da minha formação.

Aos meus pais, Welislaine Cristina Liberio e Thiago Alexandre Pinto da Silva, por todo amor, apoio e incentivo incondicional em cada etapa da minha trajetória. A confiança que sempre depositaram em mim, aliada aos valores que me ensinaram, foi essencial para que eu chegasse até aqui e superasse cada desafio. “Esta conquista também é de vocês”.

Aos meus avós, (*in memoriam*) José Liberio Sobrinho e Divina Balbina Liberio, por todo amor, exemplo e ensinamentos que permanecem vivos em minha memória, continuando a guiar meus passos e a inspirar minhas conquistas.

Aos servidores, mestrandos e membros do CEBIO do IF Goiano – Campus Ceres, por toda ajuda, parceria e momentos compartilhados ao longo dessa caminhada. Em especial, Alice Afonso, Verônica Maria, Patrícia Rasteiro, Joanis, Etevaldo, seu Zé, Thiago Dias, Valdivino, Cleisy Kelly e Cássia Rezende.

Aos amigos com quem tive o privilégio de compartilhar tantos momentos, que tornaram esta jornada mais que especial, pelas risadas, conversas sinceras e ajuda nos momentos de maior dificuldade, onde juntos transformávamos situações difíceis em momentos de alegria, em especial Camilly Eduarda Braz Dias, Cesar Augusto Gonçalves do Amaral, Douglas Vinicius Braz Dias, Matheus Dias Teixeira, Sara Marques dos Anjos e Sinval Fernandes de Lima Filho.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, fizeram parte desta trajetória, deixando meus sinceros agradecimentos a cada um que contribuiu para a realização desta conquista.

“O sucesso nasce do querer, da determinação e da persistência”

José de Alencar

RESUMO

O cultivo de alface (*Lactuca sativa* L.) em sistemas de Agricultura em Ambiente Controlado (do inglês “*Controlled Environment Agriculture*” - CEA), tem ganhado destaque pela eficiência produtiva, uso racional de recursos e possibilidade de manejo preciso de fatores ambientais. A intensidade luminosa e a aplicação de microrganismos promotores de crescimento se destacam como estratégias capazes de modular respostas fisiológicas, morfológicas e metabólicas das plantas. O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da inoculação com *Bacillus subtilis* UFV S1 e *Priestia aryabhattai* CCT 7986, isoladas ou em consorcio, combinada a duas intensidades luminosas (PPFD) 700 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e 950 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, no desenvolvimento de alface crespa (variedade Itapuã super) em cultivo *indoor*. Foram conduzidos ensaios de quantificação de células viáveis, germinação, análises morfométricas, avaliações fisiológicas, determinação dos teores nutricionais em folhas e raízes e caracterização do perfil metabólico por GC-MS (Cromatografia Gasosa acoplada à Espectrometria de Massas), complementada por análises multivariadas (PCA e PLS-DA). Os resultados indicaram que a inoculação elevou significativamente a germinação das sementes de alface, enquanto a interação entre intensidade luminosa e microrganismos influenciou de forma positiva a população bacteriana no substrato. O uso dos bioinsumos alterou o metabolismo das plantas, promovendo agrupamentos distintos conforme a intensidade de luz e o tipo de inoculação, especialmente para *P. aryabhattai* e a consorcio. Nas análises nutricionais, observaram-se incrementos em P e Zn. As características morfométricas e fisiológicas apresentaram respostas variáveis, sugerindo que a associação entre microrganismos benéficos e intensidade luminosa pode modular de forma integrada o crescimento vegetal. A integração entre bioinsumos e intensidade luminosa consolidou-se como uma abordagem promissora para otimizar a produção de alface em cultivo indoor, demonstrando que a inoculação com *B. subtilis*, aliada ao uso de menor intensidade luminosa (PPFD) 700 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, favorece o desenvolvimento morfofisiológico e aprimora o metabolismo secundário das plantas.

Palavras-chave: Agricultura sustentável; Perfil metabólico; Teor nutricional; Células viáveis.

ABSTRACT

The cultivation of lettuce (*Lactuca sativa* L.) in Controlled Environment Agriculture (CEA) systems has gained prominence due to its production efficiency, rational use of resources, and the possibility of precise management of environmental factors. Light intensity and the application of plant growth-promoting microorganisms stand out as strategies capable of modulating physiological, morphological, and metabolic responses in plants. The objective of this study was to evaluate the effect of inoculation with *Bacillus subtilis* UFV S1 and *Priestia aryabhattai* CCT 7986, applied individually or in consortium, combined with two light intensities (PPFD 700 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ and 950 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), on the development of crisp lettuce (Itapuã Super variety) grown indoors. Assays were conducted to quantify viable cells, assess germination, perform morphometric analyses, physiological evaluations, nutrient content determination in leaves and roots, and characterization of the metabolic profile by GC–MS (Gas Chromatography coupled to Mass Spectrometry), complemented by multivariate analyses (PCA and PLS-DA). The results indicated that inoculation significantly increased lettuce seed germination, while the interaction between light intensity and microorganisms positively influenced the bacterial population in the substrate. The use of bioinputs altered plant metabolism, promoting distinct clustering according to light intensity and type of inoculation, especially for *P. aryabhattai* and the consortium. Nutritional analyses revealed increases in P and Zn. Morphometric and physiological characteristics showed variable responses, suggesting that the association between beneficial microorganisms and light intensity can integratively modulate plant growth. The integration of bioinputs and light intensity proved to be a promising approach to optimizing lettuce production in indoors systems, demonstrating that inoculation with *B. subtilis*, combined with lower light intensity (PPFD 700 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), enhances morphophysiological development and improves secondary metabolism in plants.

Keywords: Sustainable agriculture; Metabolic profile; Nutritional content; Viable cells.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Bancadas de cultivo utilizadas no experimento em sistema de vertical farming, com iluminação LED e arranjo das parcelas de alface.....	12
Figura 2. Teste de compatibilidade entre <i>P. aryabhattai</i> e <i>B. subtilis</i> , onde discos representam os pontos de inoculação, permitindo observar zonas de interação entre as estirpes.	13
Figura 3. Bandeja multicelular com plântulas em estágio inicial de germinação. A) Mudas de alface antes do desbaste, com múltiplas plântulas por célula; B) Mudas de alface após o desbaste, com apenas uma plântula selecionada por célula.	15
Figura 4. Microtubos contendo material vegetal macerado e extratos líquidos obtidos durante o processo de preparação para análises laboratoriais. A) Microtubos contendo amostras vegetais secas e trituradas com solução extratora já adicionada antes do processo do processo de agitação e extração. B) Extratos filtrados, evidenciando a liberação de pigmentos, perceptíveis pela intensa coloração.	18
Figura 5. Crescimento de colônias bacterianas em diferentes diluições (10^{-6} e 10^{-7}). “A” antes e “B” depois da reinoculação com inoculos bacterianos. Onde: Bs (<i>Bacillus subtilis</i>), Pa (<i>Priestia aryabhattai</i>), Mix (consórcio de ambas) e C (tratamento controle).	26
Figura 6. Cromatogramas de íons totais (TIC) das amostras de alface a $950 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ analisadas por GC-MS.....	28
Figura 7. Cromatogramas de íons totais (TIC) das amostras de alface a $700 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ analisadas por GC-MS.....	28
Figura 8. Análises multivariadas (PCA e PLS-DA) dos perfis metabólicos de alface cultivada sob diferentes intensidades (700 -A1 e A2 e 950 - B1 e B2) após inoculação com bioinsumos bacterianos. Os scores plots de PCA e PLS-DA foram obtidos a partir dos dados de GC–MS processados no software MZmine® e analisados no MetaboAnalyst®, utilizando transformação \log_{10} e autoescalamamento.	30
Figura 9. Desenvolvimento inicial das mudas de alface (<i>Lactuca sativa</i> L.) aos 20 dias após a semeadura. Onde: A (<i>Bacillus subtilis</i>), B (<i>Priestia aryabhattai</i>), C (consórcio de ambas) e D (tratamento controle).....	35

Figura 10. Aspecto visual das plantas de alface crespa (var. Itapuã Super) aos 23 dias após o transplante. A: $700 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e B: $950 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, com variação nos tratamentos e as intensidades.....39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Taxa de germinação de alface crespa variedade Itapuã Super, após a microbiolização.....	24
Tabela 2 - Número de células viáveis em função dos níveis de intensidade luminosa, (PPFD) de 700 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ e 950 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$	25
Tabela 3 - Número de células viáveis antes da inoculação em função dos tratamentos bacterianos.....	25
Tabela 4 - Número de células viáveis em função da interação entre os tratamentos bacterianos e as intensidades luminosas após a reinoculação.	26
Tabela 5 - Teores de macronutrientes (P, K e Ca) e micronutrientes (Cu, Mn e Zn) em folhas de alface submetidas a diferentes inoculações microbianas.	32
Tabela 6 - Teor nutricional foliar em função das intensidades luminosas. (PPFD) de 700 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e 950 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	33
Tabela 7 - Teores de macronutrientes e micronutrientes no sistema radicular de alface submetidas a diferentes inoculações microbianas.	34
Tabela 8 - Teor nutricional do sistema radicular em função das intensidades luminosas. (PPFD) de 700 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e 950 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	35
Tabela 9 - Diâmetro do caule (DC 20), número de folhas (NF 20), área foliar (AF 20) e comprimento da raiz (CR 20), massa fresca da parte aérea (MFPA20), massa fresca da raiz (MFR20), massa seca da parte aérea (MSPA20) e massa seca da raiz (MSR20) das mudas aos 20 DAS.	36
Tabela 10 - Variáveis morfométricas em função dos tratamentos bacterianos. Diâmetro do caule (DC 23), volume de raiz (VR 23), comprimento de raiz (CR 23), diâmetro da copa (DCP 23), número de folhas totais (NFT 23) e produtividade (PROD 23).	37
Tabela 11 - Variáveis morfométricas em função dos tratamentos bacterianos. Massa fresca (MFPA 23) e seca da parte aérea (MSPA 23) e massa fresca (MFR 23) e seca das raízes (MSR 23) e massa total (MT 23).....	38
Tabela 12 - Variáveis morfométricas em função das intensidades luminosas. Diâmetro do caule (DC 23), volume de raiz (VR 23), comprimento de raiz (CR 23), diâmetro da copa (DCP 23), número de folhas totais (NFT 23) e produtividade (PROD 23). (PPFD) de 700 $\mu\text{mol m}^{-2}$	39

Tabela 13 - Variáveis morfométricas em função das intensidades luminosas. Massa fresca (MFPA 23) e seca da parte aérea (MSPA 23) e massa fresca (MFR 23) e seca das raízes (MSR 23) e massa total (MT 23). (PPFD) de 700 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e 950 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	40
Tabela 14 - Teores de clorofila “a”, clorofila “b”, e total em função dos tratamentos bacterianos.....	41
Tabela 15 - Teores de clorofila “a”, clorofila “b” e total em função das intensidades luminosas. (PPFD) de 700 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e 950 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	41

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS.....	4
2.1 Objetivo Geral	4
2.2 Objetivos Específicos	4
3 REVISÃO DE LITERATURA	5
3.1. Agricultura em Ambiente Controlado (<i>Controlled Environment Agriculture</i> - CEA) e <i>Vertical Farming</i>	5
3.2. Intensidade Luminosa e Fisiologia Vegetal em cultivos <i>Indoor</i>	6
3.3. Interação entre intensidade luminosa e microbiota rizosférica via exsudação radicular	7
3.4. Modulação da nutrição mineral por bactérias promotoras de crescimento de plantas (PGPB)	8
3.5. Metabolismo secundário e o uso de ferramentas metabolômicas (GC–MS) na caracterização de compostos bioativos.....	10
4 MATERIAL E MÉTODOS	12
4.1. Caracterização da área de estudo	12
4.2. Inoculação microbiana e processo germinativo das sementes de alface	13
4.3. Cultivo <i>indoor</i> e manejo experimental	15
4.4. Ensaios laboratoriais	16
4.4.1. Quantificação de células viáveis de <i>Bacillus subtilis</i> UFV S1 e <i>Priestia aryabhattai</i> CCT 7986 em cultivo <i>indoor</i>	16
4.4.2. Avaliação do perfil metabólico de alface (<i>Lactuca sativa</i> L.) inoculada com bioinsumos em cultivo <i>indoor</i>	17
4.4.3. Análises por Cromatografia Gasosa acoplada à Espectrometria de Massas (GC-MS).....	19
4.4.4. Processamento e estatística multivariada dos dados.....	19
4.4.5. Avaliação dos teores nutricionais em tecidos foliares e radiculares de alface (<i>Lactuca sativa</i> L.) inoculada com bioinsumos em cultivo <i>indoor</i>	20
4.5. Análises experimentais.....	21

4.5.1. Análises morfométricas das mudas de alface.	21
4.5.2. Análises morfométricas das plantas	22
4.5.3. Análises fisiológica das plantas	22
4.6. Análise estatística	22
5 RESULTADOS.....	24
5.1. Inoculação microbiana e processo germinativo das sementes de alface	24
5.2 Ensaios laboratoriais	24
5.2.1. Quantificação de células viáveis de <i>Bacillus subtilis</i> UFV S1 e <i>Priestia aryabhattai</i> CCT 7986 em cultivo <i>indoor</i>	24
5.2.2. Avaliação do perfil metabólico da alface (<i>Lactuca sativa</i> L.) inoculada com bioinsumos em cultivo <i>indoor</i>	27
5.2.3 Avaliação dos teores nutricionais em tecidos foliares e radiculares de Alface (<i>Lactuca sativa</i> L.) inoculada com bioinsumos em cultivo <i>indoor</i>	31
5.3. Análises experimentais.....	35
5.3.1. Análises morfométricas das mudas de alface	35
5.3.2. Análises morfométricas das plantas	37
5.3.3. Análises fisiológicas das plantas.	40
5.4. DISCUSSÃO	42
5.4.1. Inoculação microbiana e processo germinativo das sementes de alface	42
5.5. Ensaios laboratoriais	43
5.5.1 Quantificação de células viáveis de <i>Bacillus subtilis</i> UFV S1 e <i>Priestia aryabhattai</i> CCT 7986 em cultivo <i>indoor</i>	43
5.5.2. Avaliação do perfil metabólico de Alface (<i>Lactuca sativa</i> L.) inoculada com bioinsumos em cultivo <i>indoor</i>	46
5.5.3. Avaliação dos teores nutricionais em tecidos foliares e radiculares de Alface (<i>Lactuca sativa</i> L.) inoculada com bioinsumos em cultivo <i>indoor</i>	47
5.6. Análises experimentais.....	48
5.6.1 Análises morfométricas das mudas de alface	48
5.6.2 Análises morfométricas das plantas	50
5.6.3. Análises fisiológicas das plantas	53

6 CONCLUSÃO	55
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	56

1 INTRODUÇÃO

A intensificação dos impactos ambientais, como a degradação dos recursos naturais, o aumento das temperaturas globais e a pressão crescente sobre os sistemas alimentares, tem impulsionado a busca por práticas agrícolas mais resilientes, sustentáveis e tecnologicamente avançadas (FAO, 2022; IPCC, 2023). Nesse contexto, a agricultura urbana tem se reinventado com o avanço de novas tecnologias, com destaque para as fazendas verticais como uma solução engenhosa e eficiente.

O conceito de “*fazenda vertical*” refere-se ao uso de ambientes fechados e totalmente controlados, nos quais a iluminação artificial por LEDs desempenha um papel fundamental para o processo de fotossíntese (Kusuma et al., 2020). As plantas respondem tanto à intensidade quanto à qualidade da luz, além do fotoperíodo, estímulos percebidos por fotorreceptores como fitocromos e criptocromos (Pereira, 2023).

Em sistemas de cultivo *indoor*, o controle preciso da intensidade luminosa é essencial para evitar estresse por excesso de luz e, ao mesmo tempo, garantir que as plantas recebam energia suficiente para um crescimento equilibrado. Conforme destacado por Elkins e Van Iersel (2020), variações no PPFD, mesmo sob o mesmo DLI, podem alterar significativamente o desenvolvimento das plantas, refletindo a importância dessa variável no manejo de ambientes controlados.

Os fatores ambientais, como a iluminação e a microbiota do solo, são fundamentais para o crescimento vegetal otimizado, tanto em sistemas de cultivo *indoor* quanto nos convencionais. A luz, além de regular o metabolismo primário das plantas via fotorreceptores, também influencia a exsudação radicular, processo pelo qual as raízes liberam na rizosfera uma ampla gama de compostos orgânicos e inorgânicos, atuando como mediadores fundamentais das interações planta–solo–microrganismos (Pereira, 2023; Carvalho et al., 2020).

Estudos recentes mostram que PGPB (Bactérias promotoras de crescimento de plantas) podem alterar a comunidade microbiana associada às raízes, favorecendo táxons benéficos que aumentam vigor, biomassa e síntese de metabólitos funcionais. Contudo Guo et al. (2025) demonstraram que plantas saudáveis recrutam seletivamente bactérias endofíticas benéficas, como

Pseudomonas, resultando em maior crescimento e acúmulo de compostos bioativos.

De maneira complementar, Bianco et al. (2024) mostraram que PGPB modulam o metaboloma vegetal, elevando açúcares, fenóis e antioxidantes, o que reforça a tolerância a estresses e melhora a qualidade de hortaliças cultivadas.

A eficácia dessa interação, é fortemente modulada por fatores ambientais, especialmente pela intensidade luminosa. Alterações na quantidade de luz afetam diretamente a fotossíntese, a dinâmica de carbono e a liberação de exsudados radiculares que funcionam como sinais e substratos essenciais para microrganismos. De acordo com Yuan et al. (2025) evidenciaram que variações de luz alteram a composição da microbiota influenciando a atividade enzimática do solo de forma que as plantas interagem com PGPB.

Além disso, Villanó et al. (2025) discutem que microrganismos associados às raízes podem aumentar a tolerância ao estresse provocado por altas intensidades luminosas, estimulando sistemas antioxidantes como SOD, CAT e APX, e contribuindo para a fotoproteção. Nesse cenário, microrganismos benéficos desempenham um papel crucial ao promoverem o crescimento vegetal e, em algumas espécies, ao produzirem metabólitos secundários que melhoram a absorção de nutrientes e induzem a resistência sistêmica em plantas, evidenciando a conexão entre o controle luminoso e o uso de microrganismos no manejo integrado de cultivos (Santos et al., 2021).

A alface (*Lactuca sativa* L.) apresenta grande relevância agrícola devido à sua alta demanda no mercado e adaptabilidade a diferentes sistemas de cultivo. Estimativas globais indicam que o consumo de alface ultrapassa 27 milhões de toneladas por ano, refletindo sua importância econômica e nutricional (Faostat, 2023). O cultivo da alface requer atenção especial à irrigação, controle de temperatura e manejo nutricional para garantir a qualidade e uniformidade das folhas.

Sendo uma das culturas amplamente beneficiadas por sistemas de Agricultura de Ambiente Controlado devido ao seu ciclo produtivo curto e à alta sensibilidade a fatores ambientais como luz, temperatura e nutrientes. Estudos indicam que, em sistemas hidropônicos, ou em arranjos verticais sob ambiente controlado, o manejo preciso desses parâmetros pode elevar significativamente

a produtividade e a qualidade do produto final (Yang et al., 2022; Chowdhury et al., 2024).

Em sistemas de cultivo em ambiente controlado é possível ajustar com precisão parâmetros como intensidade de luz, temperatura, pH da água e condutividade elétrica, resultando em folhas de alface mais nutritivas, uniformes e com melhor textura, além de reduzir o uso de defensivos e maximizar a eficiência no uso de água e energia (Carrasco et al., 2024). Estudos mostram que essas tecnologias não apenas aumentam a eficiência no uso de recursos como água e energia, mas também contribuem para a sustentabilidade na produção de hortaliças (Jin, W. et al., 2023).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Analisar os efeitos da inoculação com *Bacillus subtilis*, estirpe UVF e *Priestia aryabhatai*, estirpe CCT 7986 correlacionado com a variação da intensidade luminosa (PPFD) $700 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e $950 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, sobre o desenvolvimento da alface (*Lactuca sativa L.*), crespa (variedade Itapuã Super) em cultivo *indoor*.

2.2 Objetivos Específicos

Estudar os efeitos da inoculação com *B. subtilis*, estirpe UVF S1 e *P. aryabhatai*, estirpe CCT 7986 sobre a germinação e crescimento inicial da alface crespa variedade (Itapuã Super).

Avaliar o potencial das bactérias *B. subtilis*, estirpe UVF S1 e *P. aryabhatai*, estirpe CCT 7986 na modulação do teor nutricional das plantas, por meio da quantificação de macro e micronutrientes presentes nas raízes e folhas de alface.

Verificar alterações no perfil metabólico da alface submetida pelas bactérias *B. subtilis*, estirpe UVF S1 e *P. aryabhatai*, estirpe CCT 7986 em diferentes intensidades luminosas.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Agricultura em Ambiente Controlado (*Controlled Environment Agriculture - CEA*) e *Vertical Farming*

A Agricultura em Ambiente Controlado (CEA) configura-se como um paradigma na produção de alimentos, essencial para mitigar os impactos da escassez do solo, do crescimento populacional e das adversidades climáticas (Wicharuck, 2023).

O cultivo de alface (*Lactuca sativa* L.) é uma cultura amplamente cultivada em “fazendas verticais” devido à sua arquitetura compacta, ciclo de crescimento rápido e alta demanda de mercado, além da sua adaptabilidade a sistemas de cultivos *indoor* (Wicharuck et al., 2023). A principal vantagem do CEA reside na eficiência de recursos.

A recirculação da solução nutritiva nos sistemas hidropônicos, combinada com a baixa taxa de evaporação em ambientes fechados, resulta em uma economia de água que pode superar os 90% em comparação com a agricultura convencional (Machado et al., 2021). Além disso, a verticalização maximiza a produção por metro quadrado de solo, permitindo o cultivo em áreas urbanas ou em zonas com solo infértil, o que contribui diretamente para a segurança alimentar urbana.

A gestão da atmosfera é um diferencial crucial da CEA. O controle preciso de temperatura, umidade e, notavelmente, a suplementação de dióxido de carbono (CO₂), que pode ser elevada acima das concentrações atmosféricas (e.g., 1000 ppm), impulsiona a taxa fotossintética e a produtividade da biomassa, especialmente em conjunção com altas intensidades luminosas (Viršile et al., 2019).

Outro aspecto fundamental é o controle fitossanitário. O ambiente fechado atua como uma barreira física contra pragas e patógenos externos, minimizando a necessidade do uso de defensivos químicos. Adota-se, portanto, um Manejo Integrado de Pragas (IPM) mais rigoroso, que se baseia principalmente em barreiras, monitoramento e, em alguns casos, agentes biológicos, resultando em produtos livres de pesticidas e maior rastreabilidade (Machado et al., 2021).

Entretanto, a adoção em larga escala de FVIs enfrenta o desafio da sustentabilidade econômica. O principal entrave é o custo de energia elétrica

necessário para a iluminação artificial (LEDs) e para a climatização do ambiente (refrigeração, desumidificação). A pesquisa atual se concentra em estratégias para otimizar o Uso Eficiente de Energia (UEE), como a calibração de espectros de luz específicos e a determinação do balanço ideal entre PPFD, DLI e concentração de CO₂ que maximize a biomassa por *watt* de energia consumida (Panduro, 2023).

3.2. Intensidade Luminosa e Fisiologia Vegetal em cultivos *Indoor*

Em sistemas de cultivo *indoor*, a luz é o fator limitante mais manejável. A precisão na sua medição e aplicação é fundamental para modular a fisiologia e a morfologia da alface. A intensidade luminosa é medida em termos de Densidade de Fluxo de Fótons Fotossinteticamente Ativos (PPFD), expressa em $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, que representa a quantidade de fótons na faixa de 400 a 700 nm que incide na superfície foliar (Panduro, 2023).

Contudo, a produção final de biomassa não depende apenas da intensidade, mas sim da Luz Diária Integral (DLI do inglês "*Daily Light Integral*") que é o PPFD somado ao longo do fotoperíodo, expresso em $\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$. O DLI é, portanto, o preditor mais preciso do crescimento, e estratégias como o aumento do fotoperíodo (extensão do tempo de exposição) sob um PPFD moderado podem ser mais eficientes e energeticamente viáveis para aumentar a produtividade da alface do que aumentar o PPFD de forma excessiva (Kelly et al., 2020).

Fisiologicamente, a alface responde ao aumento do PPFD com uma maior taxa de fotossíntese, o que geralmente leva a uma maior acumulação de matéria seca e carboidratos (Panduro, 2023). Em intensidades moderadas a altas, a planta pode aumentar a espessura foliar e a compactação das rosetas. No entanto, o excesso de luz, ou a exposição a intensidades acima do ponto de saturação, provoca um desequilíbrio na absorção de energia. O aparato fotossintético (cloroplastos) é sobrecarregado, excedendo a capacidade da planta utilizar a energia para a fixação de CO₂. Isso leva à formação de Espécies Reativas de Oxigênio (EROs), como o ânion superóxido (O₂⁻), resultando no fenômeno conhecido como foto-oxidação ou "solarização" (Panduro, 2023).

As EROs são altamente tóxicas e podem causar danos irreversíveis a lipídeos de membrana, proteínas e DNA (Panduro, 2023). Em resposta, a alface

aciona seu sistema de defesa antioxidante, que é um ponto de interesse crucial em pesquisas de qualidade. Este sistema é composto por enzimas como a Superóxido Dismutase (SOD), que converte o ânion superóxido em peróxido de hidrogênio (H_2O_2), e a Catalase (CAT) e a Ascorbato Peroxidase (APX), que detoxificam o H_2O_2 .

A variação no PPFD e no DLI é, portanto, um modulador direto da atividade dessas enzimas e, conseqüentemente, da qualidade nutracêutica da alface, que está ligada ao acúmulo de compostos bioativos como carotenoides e compostos fenólicos. A manipulação da luz torna-se, assim, uma ferramenta para o biofortificação da alface (Upadhyay et al., 2022).

3.3. Interação entre intensidade luminosa e microbiota rizosférica via exsudação radicular

A intensidade e o espectro luminoso exercem influência direta não apenas sobre a fotossíntese, mas também sobre a quantidade e o perfil químico dos exsudados radiculares, que são determinantes para a estruturação da microbiota da rizosfera. Variações no PPFD modulam a partição de carbono entre parte aérea e raízes, modificando a disponibilidade de açúcares, aminoácidos, ácidos orgânicos e compostos fenólicos que sustentam a comunidade microbiana (Upadhyay et al., 2022).

Em condições de luz elevada, plantas frequentemente aumentam o fluxo de fotoassimilados para as raízes, ampliando a exsudação de compostos energéticos; contudo, sob estresses luminosos, há tendência de liberação de metabólitos de defesa e antioxidantes, alterando seletivamente o recrutamento microbiano (Han et al., 2023).

Em sistemas CEA e hidropônicos, onde o solo não atua como tampão microbiológico, o efeito da luz sobre o perfil de exsudação torna-se ainda mais pronunciado. Estudos recentes demonstram que tanto a intensidade quanto a qualidade espectral modificam a composição dos exsudatos luz azul, por exemplo, tende a aumentar compostos fenólicos, enquanto espectros avermelhados favorecem liberação de açúcares simples impactando diretamente a estrutura da comunidade bacteriana associada às raízes (Kelly et al., 2020).

Dessa forma, o manejo luminoso condiciona quais grupos microbianos possuem vantagem competitiva no ambiente rizosférico, favorecendo grupos copiotróficos em ambientes com maior disponibilidade de carbono ou estimulando bactérias capazes de metabolizar compostos específicos liberados pela planta (Bakki et al., 2024).

Essas alterações têm consequências agronômicas importantes. Mudanças no padrão de exsudação podem favorecer a colonização por bactérias promotoras de crescimento (PGPB), que contribuem para solubilização de nutrientes, produção de fitohormônios, proteção contra patógenos e regulação de estresses abióticos (Upadhyay et al., 2022).

Ao mesmo tempo, a planta ajusta a composição dos exsudados como mecanismo de “seleção ativa” de microrganismos benéficos, um fenômeno já descrito como recrutamento rizosférico dependente do estado fisiológico (Han et al., 2023).

Assim, a interação luz × microbiota configura uma via fundamental para compreender a variabilidade de respostas em sistemas indoor, onde diferenças relativamente pequenas de PPFD podem gerar alterações mensuráveis na densidade e diversidade microbiana da rizosfera (Jensen et al. 2024).

3.4. Modulação da nutrição mineral por bactérias promotoras de crescimento de plantas (PGPB)

As bactérias promotoras de crescimento de plantas (PGPB) exercem papel fundamental na modulação da nutrição mineral, atuando por mecanismos químicos, fisiológicos e ecológicos que aumentam a disponibilidade e a absorção de nutrientes. Entre esses mecanismos, destacam-se a solubilização de fósforo por meio da liberação de ácidos orgânicos, a produção de sideróforos, a síntese de fitohormônios e a modulação do estresse via ACC-desaminase, além de alterações na arquitetura radicular (Bakki et al., 2024; Jensen et al., 2024). Esses processos tornam os nutrientes mais acessíveis às plantas e ampliam a eficiência fisiológica, especialmente em sistemas de cultivo de ambiente controlado.

A solubilização de fósforo (P) é um dos mecanismos mais relevantes, onde diversas PGPB aumentam a disponibilidade de P ao acidificarem a rizosfera por meio da excreção de ácidos orgânicos, como ácido cítrico, oxálico

e glicônico, tornando solúveis formas de fosfato originalmente indisponíveis (Bakki et al., 2024).

Em cultivos sem solo ou com baixa capacidade tampão, como ocorre em hidroponia e substratos, pequenas variações locais de pH geradas por essas bactérias resultam em aumento significativo da fração disponível de P, favorecendo o acúmulo do nutriente nos tecidos vegetais (Laurindo et al., 2024).

Outro mecanismo essencial para a nutrição é a produção de sideróforos, moléculas quelantes de alta afinidade por ferro, capazes de mobilizar Fe^{3+} de formas pouco solúveis. A atividade siderofórica contribui não apenas para o suprimento de ferro, mas também para a mobilização indireta de micronutrientes como zinco e manganês, além de restringir competitivamente a disponibilidade de ferro para patógenos (Ahmad et al., 2025). Em hortaliças cultivadas em sistemas protegidos, sideróforos produzidos por espécies de *Bacillus* têm sido associados a maior acúmulo foliar de micronutrientes e melhoria na fisiologia das plantas.

De acordo com Jensen et al. (2024) a atuação das PGPB também ocorre pela modulação da morfologia radicular, já que muitas dessas bactérias produzem fitohormônios como o ácido indolacético (AIA), que estimula a emissão de raízes laterais, pelos radiculares e o aumento da área superficial explorada, demonstraram que cepas de *Bacillus subtilis* elevam a área radicular e, com isso, aumentam a absorção de P, K e micronutrientes. Além disso, a presença da enzima ACC-desaminase reduz a síntese de etileno em situações de estresse, permitindo melhor funcionamento metabólico e maior eficiência na absorção de nutrientes.

Em sistemas hidropônicos e cultivos indoor, onde a microbiota é reduzida e a dinâmica nutricional é totalmente dependente da solução nutritiva, a inoculação com PGPB apresenta efeitos particularmente marcantes, que o uso de PGPB combinado à solução nutritiva em alface aumentou a absorção de N, P, Ca e Zn, além de melhorar o acúmulo de biomassa. Esses resultados reforçam que bioinsumos microbianos podem otimizar o uso de fertilizantes e aumentar o desempenho fisiológico em sistemas de agricultura em ambiente controlado (Laurindo et al., 2024).

No caso de *B. subtilis*, evidências recentes indicam que a espécie possui forte capacidade de solubilizar P, produzir sideróforos e estimular o crescimento radicular, resultando em maior eficiência nutricional, especialmente em hortaliças (Jensen et al., 2024). Somam-se a isso achados de estudos emergentes com *P. aryabhatai*, uma espécie reclassificada a partir do complexo *Bacillus*, que apresenta genes associados à produção de AIA, sideróforos e resistência a estresses abióticos.

Contudo Almirón et al. (2025) mostraram que *P. aryabhatai* possui alto potencial para promover crescimento e melhorar a nutrição mineral em culturas cultivadas em condições de estresse, o que a posiciona como candidata promissora para bioinsumos aplicados em sistemas de produção indoor.

De forma integrada, as PGPB modulam a nutrição mineral por meio da combinação entre: alterações químicas na rizosfera, estimulação da morfologia radicular e alívio de estresses que prejudicam a absorção de nutrientes. Em cultivos de ambiente controlado, como vertical farming e hidroponia, esses efeitos tornam-se ainda mais expressivos, ampliando a eficiência nutricional e favorecendo plantas mais vigorosas, com maior acúmulo de biomassa e nutrientes nas folhas exatamente como observado em estudos recentes que integram PGPB e sistemas CEA (Bakki et al., 2024; Laurindo et al., 2024; Almirón et al., 2025).

3.5. Metabolismo secundário e o uso de ferramentas metabolômicas (GC-MS) na caracterização de compostos bioativos

O metabolismo secundário em plantas compreende um conjunto amplo de compostos produzidos a partir de rotas biossintéticas especializadas, incluindo fenóis, flavonoides, terpenos, ácidos graxos modificados e compostos voláteis. Em hortaliças folhosas, como a alface (*Lactuca sativa*), esses metabólitos são frequentemente associados a funções relacionadas à defesa, sinalização, qualidade nutricional e características sensoriais. Estudos recentes têm indicado que fatores ambientais, como intensidade luminosa, temperatura e nutrição, bem como fatores biológicos, como a interação com microrganismos, podem influenciar a síntese e o acúmulo desses compostos (Santana et al., 2024; Castro; Santos; Menezes, 2024).

A luz é apontada como um dos reguladores mais relevantes na modulação do metabolismo secundário. Pesquisas descrevem que variações na irradiância podem alterar rotas ligadas à produção de compostos antioxidantes, especialmente os provenientes da via fenilpropanóide, tais como flavonoides e ácidos fenólicos. Em condições de maior intensidade luminosa, essas rotas têm sido relatadas como mais ativas, enquanto níveis mais baixos de luz podem resultar em ajustes metabólicos associados a rotas primárias e intermediárias (Castro; Santos; Menezes, 2024).

O uso de microrganismos benéficos, como bactérias promotoras de crescimento vegetal (PGPB), tem sido investigado como possível modulador de rotas metabólicas relacionadas a compostos secundários. De acordo com algumas pesquisas, micro-organismos como espécies de *Bacillus* e *Priestia* podem interagir com vias de sinalização hormonal, disponibilidade de nutrientes e mecanismos de estresse oxidativo, o que seria capaz de alterar a composição e a abundância de metabólitos secundários em folhas de hortaliças (Escobar et al., 2024; Almirón et al., 2025).

Entre as ferramentas utilizadas para caracterização desses compostos, a cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (GC–MS) destaca-se como um dos métodos mais estabelecidos. A técnica tem sido amplamente descrita em pesquisas voltadas à identificação de compostos voláteis e semivoláteis, incluindo aldeídos, cetonas, álcoois, terpenos e derivados de ácidos graxos comuns no metabolismo secundário de alface (Shah et al., 2024).

Além da identificação dos compostos, análises metabolômicas contemporâneas frequentemente utilizam métodos estatísticos multivariados, como Análise de Componentes Principais (PCA) e Análise Discriminante por Mínimos Quadrados Parciais (PLS-DA), para interpretar padrões metabólicos e explorar a separação entre grupos experimentais. Esses métodos têm sido relatados como eficientes para revelar mudanças em perfis químicos associados a variações ambientais, nutricionais ou biológicas (Santana et al., 2024; Shah et al., 2024).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Caracterização da área de estudo

O experimento foi conduzido entre os meses de maio a julho de 2025, sob sistema de cultivo em ambiente controlado, no Laboratório de Tecnologias de Irrigação (Lab.TI) no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano (IF Goiano – Campus Ceres), localizado no município de Ceres, Goiás, Brasil (15°21'02"S de latitude, 49°35'55"W de longitude e altitude de 564 m).

Foram utilizadas estruturas de cultivo (Figura 1), dispostas em estantes metálicas, equipadas com uma fonte de iluminação artificial por lâmpadas LED com 175 W de potência (Philips, GreenPower LED Production Module, modelo GPL TLL 500 DRWFR_2_200-400v 2.2 S, México), posicionadas de forma uniforme sobre as bancadas, garantindo uma distribuição uniforme da luz em toda a área de cultivo e fotoperíodo de 12 horas.



Figura 1. Bancadas de cultivo utilizadas no experimento em sistema de vertical farming, com iluminação LED e arranjo das parcelas de alface.

Fonte: Arquivo pessoal, 2025.

A temperatura e a umidade relativa do ar no interior do ambiente foram monitoradas com auxílio de termo-higrômetros digitais (AK28 New, Rio Grande do Sul, Brasil). Durante o período experimental a temperatura do ambiente foi mantida em 24°C e as temperaturas das bancadas estabilizadas em 26° C para a intensidade de 700 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, e 30 °C para a intensidade de 950 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

4.2. Inoculação microbiana e processo germinativo das sementes de alface

Para o teste de germinação de sementes de alface foi adotado o delineamento em blocos casualizados (DBC) 4 x 5, com os seguintes tratamentos: inoculantes comerciais (bioinsumos) *Bacillus subtilis* estirpe UVF S1 (Bio Raiz Pro) e *Priestia aryabhattai* estirpe CCT 7986 (Biohidric) da SoluBio, isoladamente e em consórcio e tratamento controle, sem inoculação. Foram utilizadas 48 sementes por parcela, totalizando 240 sementes por tratamento.

As bactérias foram crescidas em placas de Petri contendo ágar nutriente (Kasvi®) no Laboratório de Interações Microbianas e Biotecnologia (LIMBIO) do IFGoiano – Campus Ceres. Em seguida, procedeu-se ao teste de compatibilidade entre as duas estirpes bacterianas utilizando a técnica de difusão em disco, amplamente empregada para detectar interações antagonísticas entre microrganismos (Eucast, 2024; Hossain et al., 2024). As placas foram incubadas a 28 °C por 48 h, e a observação da ausência de halos de inibição entre as cepas, confirmou a compatibilidade (Figura 2) entre *B. subtilis* e *P. aryabhattai*, autorizando sua utilização conjunta nos tratamentos experimentais.



Figura 2. Teste de compatibilidade entre *P. aryabhattai* e *B. subtilis*, onde discos representam os pontos de inoculação, permitindo observar zonas de interação entre as estirpes. **Fonte:** Arquivo pessoal, 2025.

Após o teste de antagonismo colônias puras foram inoculadas em tubos de ensaio contendo 10 mL caldo nutriente (Kasvi®) e incubadas a 28 °C em Incubadora Shaker (Solab, modelo SL 222, Piracicaba, SP, Brasil) a 180 rpm por 24 h constituindo então o pré-inóculo.

Após 24 h, 1% do pré-inóculo foi transferido para um Erlenmeyer com caldo nutriente estéril e incubado novamente a 28 °C a 180 rpm durante 24 h, constituindo, assim, o inóculo. Após este período, a densidade óptica (DO) a 600 nm foi lida em espectrofotômetro (Duplofeixe UV-Visível, Global Analyzer, modelo GTA-101, Calgary, Canadá) e padronizada para a concentração final de 1×10^{-9} Unidades Formadoras de Colônia (UFC) mL⁻¹.

As sementes de alface crespa variedade Itapuã Super (Isla Sementes, Porto Alegre, RS, Brasil) foram desinfestadas superficialmente por imersão em solução de hipoclorito de sódio (NaOCl) 1% por um minuto e, em seguida, em álcool 70% por mais um minuto. Posteriormente, as sementes foram lavadas em água destilada estéril e dispostas em papel filtro estéril para secagem natural em fluxo laminar (adaptado de Araújo et al., 2001).

Após este processo as sementes não tratadas, livres de qualquer tratamento químico ou biológico prévio, foram tratadas por imersão em suspensões bacterianas por 30 minutos, na proporção de 1 mL de bioinsumo por grama de semente, em capela de fluxo laminar. As sementes do controle negativo foram igualmente desinfestadas, porém não passaram pelo procedimento de imersão, sendo semeadas diretamente no substrato.

Após secas, as sementes foram semeadas em bandejas de poliestireno expandido de 128 células, com substrato comercial específico para a produção de hortaliças Topstrato HA Hortaliças® (Genfertil, Provaso, Indústria e Comércio de Fertilizantes Orgânicos, Mogi Mirim, São Paulo, Brasil), composto por casca de pinus, turfa e vermiculita expandida, enriquecido com macro e micronutrientes, como o PG Mix 14.16.18, Nitrato de Potássio e Superfosfato Simples.

Foram adicionadas três sementes por célula (Figura 3A), seguindo as recomendações técnicas para o cultivo da espécie, a fim de garantir uma taxa de germinação satisfatória. O monitoramento da emergência foi realizado diariamente até o momento do desbaste, ocorrido aos sete dias após a semeadura, quando foi mantida apenas uma muda vigorosa por célula (Figura

3B). Durante essa fase, as bandejas permaneceram em casa de vegetação, até a realização do transplante.



Figura 3. Bandeja multicelular com plântulas em estágio inicial de germinação. A) Mudanças de alface antes do desbaste, com múltiplas plântulas por célula; B) Mudanças de alface após o desbaste, com apenas uma plântula selecionada por célula.

Fonte: Arquivo pessoal, 2025.

4.3. Cultivo *indoor* e manejo experimental

Para esta etapa foi adotado o delineamento inteiramente casualizado (DIC), em esquema fatorial 4×2 combinando duas estirpes bacterianas: *Bacillus subtilis* UFV S1, *Priestia aryabhattai* CCT 7986, consórcio de ambas e ausência de inoculação (testemunha) e duas intensidades luminosas (PPFD) ou densidade de fluxo de fótons fotossinteticamente ativos: $700 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ e $950 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, com 3 repetições por tratamento.

O transplante das mudas foi realizado aos 20 dias após a semeadura (DAS), utilizando as plantas provenientes da etapa de germinação. As mudas foram transferidas para vasos com capacidade de 4 litros, preenchidos com substrato comercial Jiffi® (Jiffy Group, Rotterdam, Holanda), composto por turfa, vermiculita, fibras de coco, madeira, casca de pinheiro, argilas minerais e matéria orgânica. Durante o período de cultivo, foi realizada irrigação diária, aplicando-se 50 mL de fertirrigação (descrita abaixo) por vaso, como forma de garantir o suprimento adequado de água e nutrientes para as plantas.

Para a fertirrigação realizada via drench foi utilizada solução nutritiva (PLANTPAR®), específica para culturas folhosas, seguiu a fórmula padrão de

Furlani (1998), uma formulação amplamente empregada em cultivos hidropônicos de hortaliças, com a seguinte composição: N (10%), Ca (15%), Mg (3%), P (8%), K (30%), S (3%), Fe (0,14%), B (0,04%), Mn (0,04%), Cu (0,03%), Zn (0,019%), Mo (0,009%), Ni (0,006%) e Co (0,002%), sendo completamente renovada a cada 7 dias.

O pH da solução foi mantido dentro da faixa ideal de 5,5 a 6,5, conforme indicado por Furlani (2002), assim como a condutividade elétrica da solução, mantida na faixa de 400 a 700 S/m (siemens/metro). Ambos foram monitorados diariamente com ajustes de pH utilizando ácido acético glacial (CH_3COOH) de forma concentrada, garantindo a estabilidade da solução, a qual era renovada a cada 7 dias.

Logo após a realização do transplante foi realizada a inoculação de 1 mL da suspensão bacteriana (1×10^{-9} UFC mL^{-1}) via *drench* que consiste na aplicação do inóculo diretamente na base da planta. As reinoculações foram realizadas a cada 7 dias até os 22 dias após o transplante (DAT) com um total de 3 reinoculações durante a condução do experimento. Para o controle negativo as plantas receberam apenas solução nutritiva.

4.4. Ensaios laboratoriais

4.4.1. Quantificação de células viáveis de *Bacillus subtilis* UFV S1 e *Priestia aryabhattai* CCT 7986 em cultivo indoor

Para a quantificação das células viáveis de *B. subtilis* e *P. aryabhattai* do substrato onde foram realizadas as inoculações, utilizou-se o método de diluição seriada decimal seguido da técnica de plaqueamento em ágar nutriente (Kasvi®) conforme descrito por Castro e Scheffer (2025).

Foram coletadas 24 amostras de 5 g de substrato de cada tratamento (*B. subtilis* UFV S1, *P. aryabhattai* CCT 7986, consórcio e controle). Dessas, 12 amostras foram retiradas da bancada de cultivo com PPFD de $700 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e 12 da bancada com PPFD $950 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. As coletas foram realizadas ao longo do experimento, considerando que a reinoculação das bactérias ocorria semanalmente. Para cada ciclo, o substrato era coletado antes da reinoculação e novamente dois dias após a aplicação, permitindo a análise comparativa entre as condições “antes” e “depois” da inoculação.

Após este processo, 0,1 g de cada tratamento foram transferidos para microtubos de 2,0 mL estéreis contendo 900 µL de solução salina (NaCl) estéril a 0,9%. A mistura foi submetida à agitação em vórtex por aproximadamente 1 minuto, garantindo a adequada suspensão das partículas sólidas e dos microrganismos presentes. A partir dessa suspensão inicial (diluição 1×10^{-1}), foram realizadas diluições seriadas em base decimal, transferindo-se 100 µL da solução de um tubo para outro, cada um contendo 900 µL de solução salina 0,9%, até atingir a diluição final de 1×10^{-7} .

As diluições 10^{-6} e 10^{-7} foram utilizadas para o plaqueamento, aplicando-se 100 µL de cada sobre a superfície de placas de Petri contendo ágar nutriente previamente solidificado. A inoculação foi realizada por espalhamento com o auxílio de alças Drigalski, estéreis, em formato de “L”, realizando movimentos circulares suaves sobre toda a superfície do meio para garantir a dispersão homogênea das células viáveis. Cada diluição foi plaqueada em triplicata, totalizando seis placas por amostra (três para 10^{-6} e três para 10^{-7}).

As placas inoculadas foram incubadas em B.O.D a 28 °C e observadas diariamente por um período de 72 horas. Após o período de incubação, realizou-se a contagem das unidades formadoras de colônia (UFC). Os resultados obtidos foram calculados e expressos em UFC mL⁻¹, considerando os respectivos fatores de diluição.

4.4.2. Avaliação do perfil metabólico de alface (*Lactuca sativa* L.) inoculada com bioinsumos em cultivo *indoor*

Para a análise metabólica, seguiu-se metodologia adaptada de Asif et al. (2021) e Cabrera Peralta; Peña Álvarez (2024) onde, foram coletadas três folhas de alface, sendo uma folha por tratamento em cada bancada experimental, totalizando 12 amostras com PPFD de 700 µmol m⁻² s⁻¹ e 12 com PPFD 950 µmol m⁻² s⁻¹. As folhas foram selecionadas com base em um padrão visual semelhante de tamanho, a fim de garantir a homogeneidade das amostras. Em seguida, foram previamente higienizadas com água ultrapura para a remoção de impurezas e partículas aderidas à superfície, sendo posteriormente secas com papel toalha absorvente.

Após a secagem superficial, as amostras foram dispostas em uma bandeja metálica devidamente estéril com álcool 70%, e adicionadas em estufa com circulação de ar forçada (modelo TE-394/1-MP), mantida a 50 °C, durante 48 h, visando a completa desidratação do material vegetal. Ao término do processo, as amostras foram trituradas manualmente até obtenção de um pó homogêneo, utilizando liquidificador previamente higienizado com álcool 70%. O material triturado foi armazenado, em sacos plásticos estéreis, em um ambiente ao abrigo da luz até a realização do processo de extração dos metabólitos.

Para a extração foi preparada uma solução hidroalcoólica a 70%, em uma proporção de 350 mL de etanol (99%) e 150 mL de água purificada, totalizando 500 mL da solução extratora. Após o preparo da solução foram pesadas amostras de 0,150 g de material vegetal seco e triturado de cada tratamento e transferidos para microtubos de 2,0 mL estéreis, aos quais foram adicionados 1,5 mL da solução extratora.

As amostras foram submetidas à agitação em vórtex por 1 minuto, com o objetivo de promover a adequada homogeneização e facilitar a extração dos metabólitos presentes no tecido vegetal. Em seguida, o conteúdo de cada microtubo foi filtrado, e os compostos de interesse, foi cuidadosamente transferido para novos microtubos estéreis, devidamente identificados (Figura 4). Estes extratos foram armazenados sob refrigeração (geladeira a 28° C), até a etapa de análise instrumental.

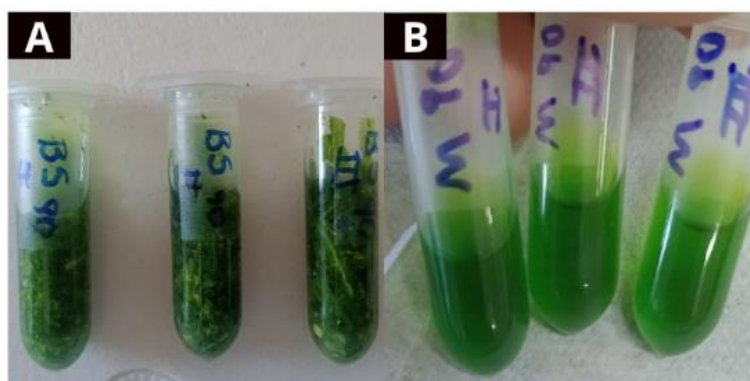


Figura 4. Microtubos contendo material vegetal macerado e extratos líquidos obtidos durante o processo de preparação para análises laboratoriais. A) Microtubos contendo amostras vegetais secas e trituradas com solução extratora já adicionada antes do processo do processo de agitação e extração. B) Extratos filtrados, evidenciando a liberação de pigmentos, perceptíveis pela intensa coloração.

Fonte: Arquivo pessoal, 2025.

4.4.3. Análises por Cromatografia Gasosa acoplada à Espectrometria de Massas (GC-MS)

As análises por GC-MS foram realizadas em um sistema Agilent 8860 GC acoplado a um espectrômetro de massas de simples quadrupolo Agilent 5977B GC/MSD (Agilent Technologies, EUA), com amostrador manual. As temperaturas do injetor, da interface do espectrômetro, da fonte de íons e do quadrupolo foram mantidas em 260, 310, 230 e 150 °C, respectivamente. Um microlitro do extrato foi injetado no modo *split* (1:20), utilizando hélio como gás de arraste, com fluxo constante de 1,0 mL min⁻¹.

A separação cromatográfica foi conduzida em uma coluna capilar Rtx-5MS (5% difenil-95% dimetilpolisiloxano; 30 m × 0,25 mm i.d. × 0,25 µm de espessura de filme Restek, EUA). O programa de temperatura do forno foi iniciado a 60 °C (1 min), seguido de aumento de 20 °C min⁻¹ até 310 °C, permanecendo nessa temperatura por 7 min.

Os espectros de massa foram adquiridos no modo varredura total (*full scan*), na faixa de 40–550 m/z, com *solvent delay* de 1 min. A identificação dos compostos foi realizada por comparação dos espectros obtidos com a biblioteca NIST (*National Institute of Standards and Technology*) por meio do software Agilent MassHunter.

4.4.4. Processamento e estatística multivariada dos dados

Os cromatogramas de íons totais (TIC) obtidos foram exportados a partir do *software* Agilent MassHunter e convertidos para o formato mzDATA para posterior processamento. O tratamento dos dados brutos foi realizado no *software* MZmine®, contemplando as etapas de detecção de massas, construção dos cromatogramas de desconvolução, alinhamento e gap filling.

As matrizes resultantes foram, então, exportadas e submetidas à análise estatística multivariada no *software* MetaboAnalyst®, onde foram aplicadas a Análise de Componentes Principais (PCA) e a Análise Discriminante por Mínimos Quadrados Parciais (PLS-DA), com o objetivo de discriminar os perfis metabólicos entre as amostras.

As áreas dos picos correspondentes aos compostos identificados foram transformadas em logaritmo (log₁₀) e autoescaladas antes da realização das análises multivariadas. A qualidade e robustez dos modelos obtidos foram

avaliadas por meio dos parâmetros R^2 (coeficiente de determinação) e Q^2 (poder preditivo), assegurando a confiabilidade das análises estatísticas.

4.4.5. Avaliação dos teores nutricionais em tecidos foliares e radiculares de alface (*Lactuca sativa* L.) inoculada com bioinsumos em cultivo *indoor*

Ao término do experimento, as amostras de folhas e raízes foram coletadas, em seguida, submetidas à secagem em estufa de circulação forçada de ar a 65 °C por 48 h, até atingirem peso constante para realização das análises de biomassa. Após o processo, o material vegetal foi triturado manualmente, utilizando liquidificador previamente higienizado com álcool 70%, obtendo-se amostras homogêneas de tecidos vegetal e radicular.

As amostras trituradas foram acondicionadas em sacos plásticos devidamente estéreis e identificados, sendo encaminhadas ao Laboratório de Solos do Instituto Federal Goiano – Campus Ceres, onde foram realizadas as análises químicas para determinação dos teores de macronutrientes (fósforo – P, potássio – K e cálcio – Ca) e micronutrientes (manganês – Mn, cobre – Cu e zinco – Zn).

A determinação dos teores dos elementos químicos foi realizada segundo metodologia descrita por Miyazawa, Pavan e Bloch (1992), utilizando extração com solução de HCl 1 mol L⁻¹, sem digestão. Esse método permite solubilizar os elementos químicos do tecido vegetal sem oxidação da matéria orgânica, sendo aplicável para determinação total de B, Ca, Cd, Co, Cu, K, Mg, Mn, Na, Ni, P, Pb e Zn. Para a preparação da solução extratora, adicionou-se 165,6 mL de ácido clorídrico em um balão volumétrico de 2 L contendo um pouco de água destilada, e completando o volume com água até o menisco.

Para o procedimento analítico, foram transferidos 0,4 g da amostra (tecido vegetal ou sistema radicular) para Erlenmeyer de 125 mL, em seguida foram adicionados 20 mL da solução de HCl 1 mol L⁻¹. Registrou-se o peso total das amostras e foram aquecidas por 15 minutos em banho-maria a 80 °C e resfriadas em temperatura ambiente, em seguida foram agitadas por 45 minutos em agitador horizontal circular a 215 rpm. Após o resfriamento, o volume inicial foi restabelecido com água destilada, e o material foi filtrado em papel de filtro qualitativo de 15 mm, obtendo-se o extrato A utilizado para determinação de Mn, Cu e Zn.

O potássio foi determinado a partir de 2 mL do extrato A diluído em 20 mL de água destilada. Já para o cálcio, utilizou-se alíquota de 1 mL do extrato A diluído, acrescida de 4 mL de solução de lantânio a 1%.

A determinação do fósforo foi realizada retirando-se 0,25 mL do extrato e adicionando 4,75 mL de água destilada e 10 mL de solução de molibdato diluído. Após adição de aproximadamente 0,05 g de ácido ascórbico, as amostras foram deixadas reagindo por 30 minutos, sendo realizadas leituras a 660 nm em espectrofotômetro UV-Viz.

Os elementos Manganês, Zinco e Cobre foi realizado leitura conforme o manual do espectrofotômetro de absorção atômica (EAA), sendo realizadas com soluções padrão e as amostras extraídas em HCl 1 mol L⁻¹.

Para esta análise específica, os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) pelo teste F, e, quando constatada significância, as médias foram agrupadas pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de significância.

O processamento estatístico foi realizado no software R para Windows, versão 4.2.2 (R Core Team, 2025).

4.5. Análises experimentais

4.5.1. Análises morfométricas das mudas de alface.

Aos 20 dias após a semeadura (DAS) foi determinada a porcentagem de germinação de acordo com Maguire (1962). Também foram realizadas análises morfométricas, avaliando diâmetro do caule (DC 20), com auxílio de paquímetro digital (King Tools, Pompéia, SP, Brasil), número de folhas verdadeiras (NF 20), área foliar (AF 20) e comprimento da raiz (CR 20), obtido através da utilização de régua graduada de 30 cm.

As análises de produção de biomassa fresca e seca da parte aérea (MFSPA, g planta⁻¹) e da raiz (MFSR, g planta⁻¹), foram realizadas seguindo a metodologia descrita por Borges et al. (2011), mantendo a massa fresca em estufa de circulação de ar forçada por 48 h, a uma temperatura de 65 °C.

4.5.2. Análises morfométricas das plantas

As análises morfométricas foram realizadas ao fim do experimento com 23 DAT avaliando diâmetro do caule (DC 23) com auxílio de paquímetro digital (King Tools, Pompéia, SP, Brasil) realizando as medições logo abaixo das folhas cotiledonares, volume de raiz (VR 23) pelo método da proveta, comprimento de raiz (CR 23), obtido com auxílio de régua graduada de 30 cm, número de folhas totais (NFT 23), diâmetro da copa (DCP 23), obtido também com o auxílio de uma régua graduada de 30 cm, produtividade por volume (PROD 23 $\text{Kg}^{-1}/\text{m}^3$) expressa em (VHP do inglês - *Volumetric Productivity*), massa fresca (MFPA, g planta⁻¹) e seca da parte aérea (MSPA, g planta⁻¹) e massa fresca (MFR, g planta⁻¹) e seca das raízes (MSR, g planta⁻¹), obtida através de uma estufa de circulação de ar forçada por 48 h, a uma temperatura de 65 °C.

4.5.3. Análises fisiológica das plantas

A análise dos pigmentos fotossintéticos (clorofila a, clorofila b e clorofila total) foi realizada ao fim do experimento com 23 DAT, por meio de medições indiretas utilizando o aparelho ClorofiLog® (Falker, Brasil). As leituras foram efetuadas em folhas completamente expandidas e fisiologicamente ativas, sempre selecionadas, adotando-se o mesmo padrão de escolha em todos os indivíduos para garantir a uniformidade das análises.

Em cada folha foram realizadas três leituras no mesmo ponto, evitando a nervura central. O equipamento forneceu os valores em unidades relativas de índice de clorofila, os quais foram utilizados para estimar a quantidade de pigmentos presentes e possibilitar a comparação entre as diferentes estirpes bacterianas e os espectros de luz avaliados.

4.6. Análise estatística

Os dados foram tabulados e submetidos ao teste de análise de variância (ANOVA) em esquema fatorial pelo teste F e as variáveis significativas comparadas pelo teste de comparação de médias de Tukey a nível de 1 e 5% de significância.

Todas as análises foram realizadas pelo software R para Windows, versão 4.2.2 (R Core Team, 2025).

5 RESULTADOS

5.1. Inoculação microbiana e processo germinativo das sementes de alface.

Os dados de germinação apresentados na Tabela 1, demonstraram que a inoculação foi significativa para o teste de germinação, por meio do teste de Tukey, a nível de significância de ($p < 0,05$).

Tabela 1 - Taxa de germinação de alface crespa variedade Itapuã Super, após a microbiolização.

Microbiolização	Germinação (%)
<i>Bacillus subtilis</i>	56,1 ± 20,81 a
<i>Priestia aryabhattai</i>	48,2 ± 21,61 ab
Consortio	45,2 ± 18,18 ab
Sem Inoculação	27,5 ± 17,78 b
F.V	p-value
Microbiolização	0,0268*
C.V (%)	46,19

Legenda: Letras diferentes na coluna indicam diferença significativa pelo teste de Tukey. *Significativo ao nível de 5% pelo teste de Tukey; **Significativo ao nível de 1% pelo teste de Tukey; ^{ns}Não significativo; F.V.: fonte de variação; C.V. (%): coeficiente de variação.

Sementes inoculadas com *B. subtilis* UVF S1 apresentaram as maiores taxas de germinação, 56,1%. As inoculações com *P. aryabhattai* CCT 7986 e o consorcio das duas bactérias resultaram em taxas de germinação intermediárias, com 48,2% e 45,2%, respectivamente, não diferindo estatisticamente entre si e nem do tratamento com *B. subtilis*. O tratamento sem inoculação apresentou a menor taxa de germinação (27,5%), diferindo estatisticamente da microbiolização com *B. subtilis*.

5.2 Ensaios laboratoriais

5.2.1. Quantificação de células viáveis de *Bacillus subtilis* UFV S1 e *Priestia aryabhattai* CCT 7986 em cultivo indoor

A interação entre os fatores não apresentou efeito estatisticamente significativo pelo teste de Tukey ($p < 0,05$) na avaliação conduzida antes do primeiro ciclo de reinoculação semanal das bactérias, evidenciando a independência entre os efeitos principais (Bactérias e Intensidades Luminosas) (Tabela 2).

Tabela 2 - Número de células viáveis em função dos níveis de intensidade luminosa, (PPFD) de 700 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ e 950 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$.

Intensidade luminosa (PPFD)	Médias (UFC/ mL^{-1})
700 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	53,59 \pm 9,87 a
950 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	50,74 \pm 9,34 a
F.V	p-value
Intensidades	0,4781 ^{ns}
C.V (%)	18,42

Legenda: Letras diferentes na coluna indicam diferença significativa pelo teste de Tukey. *Significativo ao nível de 5% pelo teste de Tukey; **Significativo ao nível de 1% teste de Tukey; ^{ns} Não significativo. F.V.: fonte de variação; C.V. (%): coeficiente de variação.

A avaliação do fator intensidade antes da inoculação, não evidenciou diferenças significativas entre os níveis testados ($p = 0,478$) e a comparação entre as duas condições avaliadas (700 e 900 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) permaneceram estatisticamente semelhantes.

A análise do número de células viáveis antes da inoculação evidenciou efeito significativo dos tratamentos bacterianos ($p = 0,001$). Os isolados bacterianos apresentaram desempenho estatisticamente superior à testemunha (sem inoculação), demonstrando incremento expressivo na concentração celular (Tabela. 3).

Tabela 3 - Número de células viáveis antes da inoculação em função dos tratamentos bacterianos.

Inoculação	Células Viáveis (UFC/ mL^{-1})
<i>Bacillus subtilis</i>	65,01 \pm 11,97 a
<i>Priestia aryabhattai</i>	58,21 \pm 10,72 a
Consortio	56,88 \pm 10,47 a
Sem Inoculação	28,55 \pm 5,25 b
F.V	p-value
Inoculação	0,001**
C.V (%)	18,42

Legenda: Letras diferentes na coluna indicam diferença significativa pelo teste de Tukey. *Significativo ao nível de 5% pelo teste de Tukey; **Significativo ao nível de 1% teste de Tukey; ^{ns} Não significativo. F.V.: fonte de variação; C.V. (%): coeficiente de variação.

Observou-se que os tratamentos com *B. subtilis* UFV S1, *P. aryabhattai* CCT 7986 e o consorcio não diferiram entre si ($P > 0,05$), apresentando médias de *B. subtilis* (Bs): 65,01 $\times 10^{-9}$ UFC mL^{-1} , *P. aryabhattai* (Pa): 58,21 $\times 10^{-9}$ UFC mL^{-1} e Mix: 56,88 $\times 10^{-9}$ UFC mL^{-1} , respectivamente. Esses valores se

aproximaram do dobro da densidade celular verificada na testemunha ($28,55 \times 10^{-9}$ UFC mL⁻¹), que se manteve estatisticamente inferior.

No entanto, após a reinoculação (Figura. 5), observou-se efeito significativo da interação entre os tratamentos bacterianos e as intensidades luminosas, evidenciando que a resposta das variáveis avaliadas passou a depender da combinação entre os tratamentos bacterianos e as diferentes intensidades (Tabela. 4).

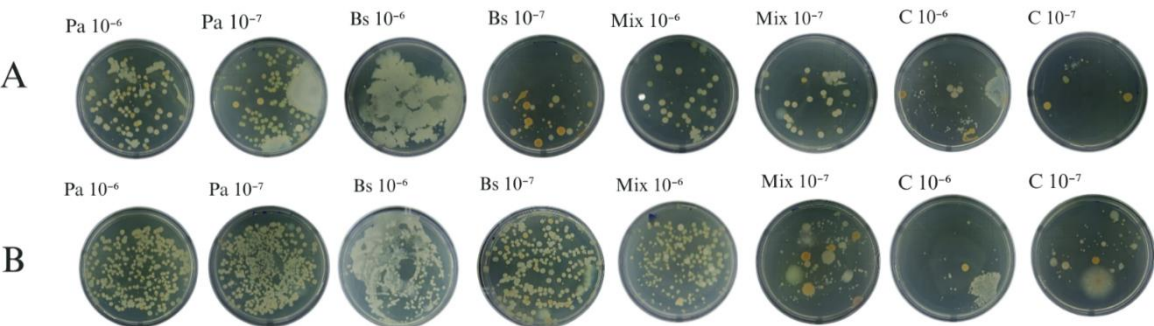


Figura 5. Crescimento de colônias bacterianas em diferentes diluições (10^{-6} e 10^{-7}). “A” antes e “B” depois da reinoculação com inoculos bacterianos. Onde: Bs (*Bacillus subtilis*), Pa (*Priestia aryabhattai*), Mix (consórcio de ambas) e C (tratamento controle).

Fonte: Arquivo pessoal, 2025.

Tabela 4 - Número de células viáveis em função da interação entre os tratamentos bacterianos e as intensidades luminosas após a reinoculação.

Inoculação	700 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	900 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
<i>Bacillus subtilis</i>	12,4 \pm 4,32 Aa	8,08 \pm 2,81 Aa
<i>Priestia aryabhattai</i>	14,95 \pm 5,21 Aa	9,18 \pm 3,20 Bb
Consortio	7,74 \pm 2,70 Aa	7,20 \pm 2,51 Aa
Sem Inoculação	2,84 \pm 0,99 Aa	2,54 \pm 0,88 Aa
FV	p-value	
Inoculação x Luz	0,0467*	
C.V (%)	34,82	

Legenda: Letras maiúsculas diferentes na linha e minúsculas na coluna indicam diferença significativa pelo teste de Tukey. *Significativo ao nível de 5% pelo teste de Tukey; **Significativo ao nível de 1% teste de Tukey; ^{ns}Não significativo. F.V.: fonte de variação; C.V. (%): coeficiente de variação.

O tratamento com *B. subtilis* UFV S1 apresentou maior valor médio sob intensidade a $700 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ($12,4 \times 10^{-9}$ UFC mL⁻¹) em relação à $950 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ($8,08 \times 10^{-9}$ UFC mL⁻¹) com maior intensidade de luz, mas não apresentaram diferenças estatisticamente significativa pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Esse resultado indica que o desempenho de *B. subtilis* foi favorecido sob

menor intensidade luminosa, sugerindo que a maior proximidade das lâmpadas pode ter exercido influência negativa sobre a atividade bacteriana.

Para *P. aryabhattai* CCT 7986 foram observadas diferenças estatisticamente significativas entre as intensidades avaliadas, embora o valor médio tenha sido numericamente superior sob $700 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ($14,95 \times 10^{-9}$ UFC mL^{-1}) em comparação a $950 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ($9,18 \times 10^{-9}$ UFC mL^{-1}). Essa estabilidade entre níveis de intensidade indica que *P. aryabhattai* manteve maior eficiência de colonização e interação com as plantas, em menor intensidade luminosa incidente.

No caso do consórcio bacteriano, os valores médios foram próximos entre os dois níveis de intensidade, apresentando ($7,74 \times 10^{-9}$ UFC mL^{-1}) $700 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e ($7,20 \times 10^{-9}$ UFC mL^{-1}) sob $950 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Apesar de as médias terem sido classificadas em grupos iguais no teste de Tukey, a diferença foi de baixa magnitude, o que demonstra que o efeito combinado das duas bactérias não sofreu influência da variação da intensidade luminosa.

Por fim, o tratamento sem inoculação apresentou os menores valores em ambas as intensidades apresentadas ($2,84 \times 10^{-9}$ UFC mL^{-1} sob 90 cm e $2,54 \times 10^{-9}$ UFC mL^{-1} $950 \mu\text{mol/m}^2\text{s}$), evidenciando que a variação da intensidade luminosa oferecida exerceu efeito limitado na ausência de microbiolização.

5.2.2. Avaliação do perfil metabólico da alface (*Lactuca sativa* L.) inoculada com bioinsumos em cultivo *indoor*.

A partir dos cromatogramas de íons totais (TIC) analisados por GC-MS, foi possível observar diferenças qualitativas e quantitativas no perfil de compostos entre os tratamentos. Essas variações refletem alterações metabólicas induzidas pelos microrganismos inoculados e as intensidades testadas, evidenciando modificações no metabolismo da alface.

Em maior intensidade, $950 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Figura 6), o tratamento C75 (controle) apresentou um maior número de picos e maior diversidade de compostos, sugerindo uma composição volátil mais complexa. Por outro lado, BS75 (*B. subtilis*) mostrou picos mais intensos nas regiões próximas a 7,8 e 9 minutos, o que indica o acúmulo de compostos específicos, possivelmente resultantes da atividade metabólica induzida pela bactéria.

Já o tratamento M75 (consorcio) apresentou um perfil intermediário, com picos de intensidade moderada e padrão semelhante ao controle, enquanto Pa75 (*P. aryabhatai*) mostrou menor número e intensidade de picos, indicando uma possível redução na emissão de voláteis.

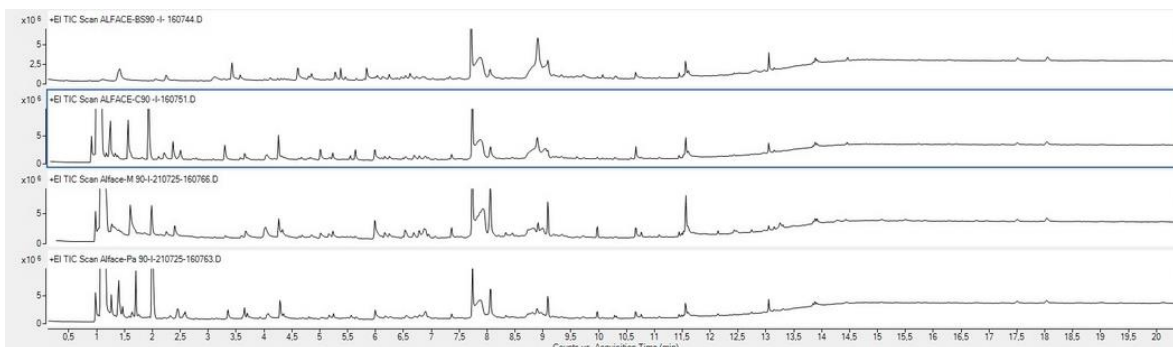


Figura 6. Cromatogramas de íons totais (TIC) das amostras de alfaca a $950 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ analisadas por GC-MS.

Fonte: Arquivo pessoal, 2025.

Sobre menor intensidade, $700 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Figura 7), o comportamento químico das amostras mostrou diferenças ainda mais evidentes. Os cromatogramas de C90 (controle) e M90 (consorcio) apresentaram picos de alta intensidade na faixa de 8 a 9,5 minutos, semelhantes aos observados em 75 dias, sugerindo persistência de determinados metabólitos voláteis.

O tratamento BS90 (*B. subtilis*) manteve picos proeminentes nas mesmas regiões, porém com menor abundância relativa, o que pode estar relacionado à adaptação metabólica da planta e redução da atividade bacteriana com o tempo. Já o tratamento Pa90 (*P. aryabhatai*) apresentou um perfil mais simples e com menor área total dos picos.

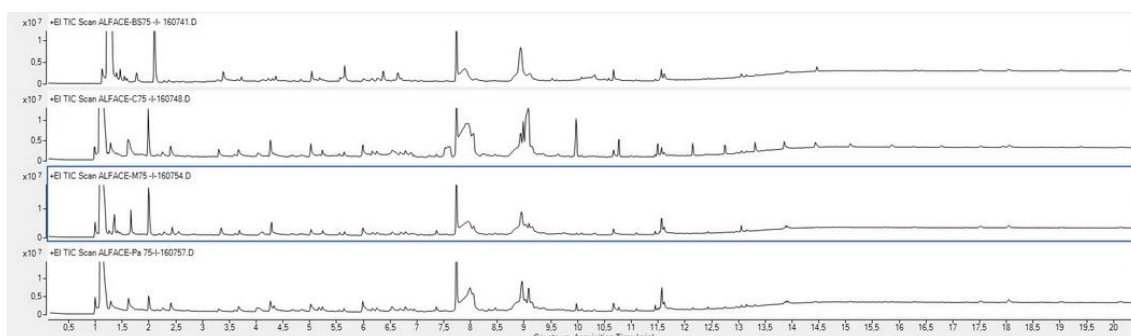


Figura 7. Cromatogramas de íons totais (TIC) das amostras de alfaca a $700 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ analisadas por GC-MS.

Fonte: Arquivo pessoal, 2025.

Dessa forma, os cromatogramas obtidos evidenciam alterações qualitativas e quantitativas nos perfis químicos da alface em resposta às diferentes inoculações bacterianas e ao tempo de cultivo. Essas informações serviram como base para a análise quimiométrica subsequente (PCA e PLS-DA), permitindo a avaliação multivariada das amostras e a identificação de padrões de agrupamento e compostos discriminantes entre os tratamentos microbianos e intensidades luminosas.

Os gráficos de PCA e PLS-DA foram obtidos a partir dos valores identificados, transformados em logaritmo (\log^{10}), e autoescalados de modo a padronizar a amplitude das variáveis. Esse processamento permite que cada *features* contribua de forma equilibrada para os modelos multivariados, garantindo maior robustez na identificação de padrões, agrupamentos e diferenças entre os tratamentos.

Nos gráficos de PCA (Figura. 8 A1 e B1), observa-se que as amostras se distribuem em grupos distintos de acordo com os tratamentos bacterianos (Bs, Pa, consorcio e C), indicando diferenças nos perfis metabólicos induzidos pelas plantas em contato com bioinsumos. Em ambas as condições de luminosidade, as componentes principais (PC1 e PC2) explicaram uma proporção considerável da variância total dos dados (superior a 40%), o que evidencia a robustez do modelo exploratório.

Sob menor intensidade $700 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ as amostras tratadas com as bactérias *P. aryabhattai* CCT 7986 e o consorcio (Figura 8 A2 e B2), formaram agrupamentos bem definidos e distantes do controle, sugerindo que esses tratamentos promoveram alterações metabólicas expressivas nas plantas, possivelmente relacionadas à modulação de vias associadas ao metabolismo secundário ou à resposta a estresse luminoso.

Já o tratamento com *B. subtilis* UFV S1 apresentou maior sobreposição com o controle, indicando um efeito menos pronunciado sobre o metabolismo sob essa condição de luz.

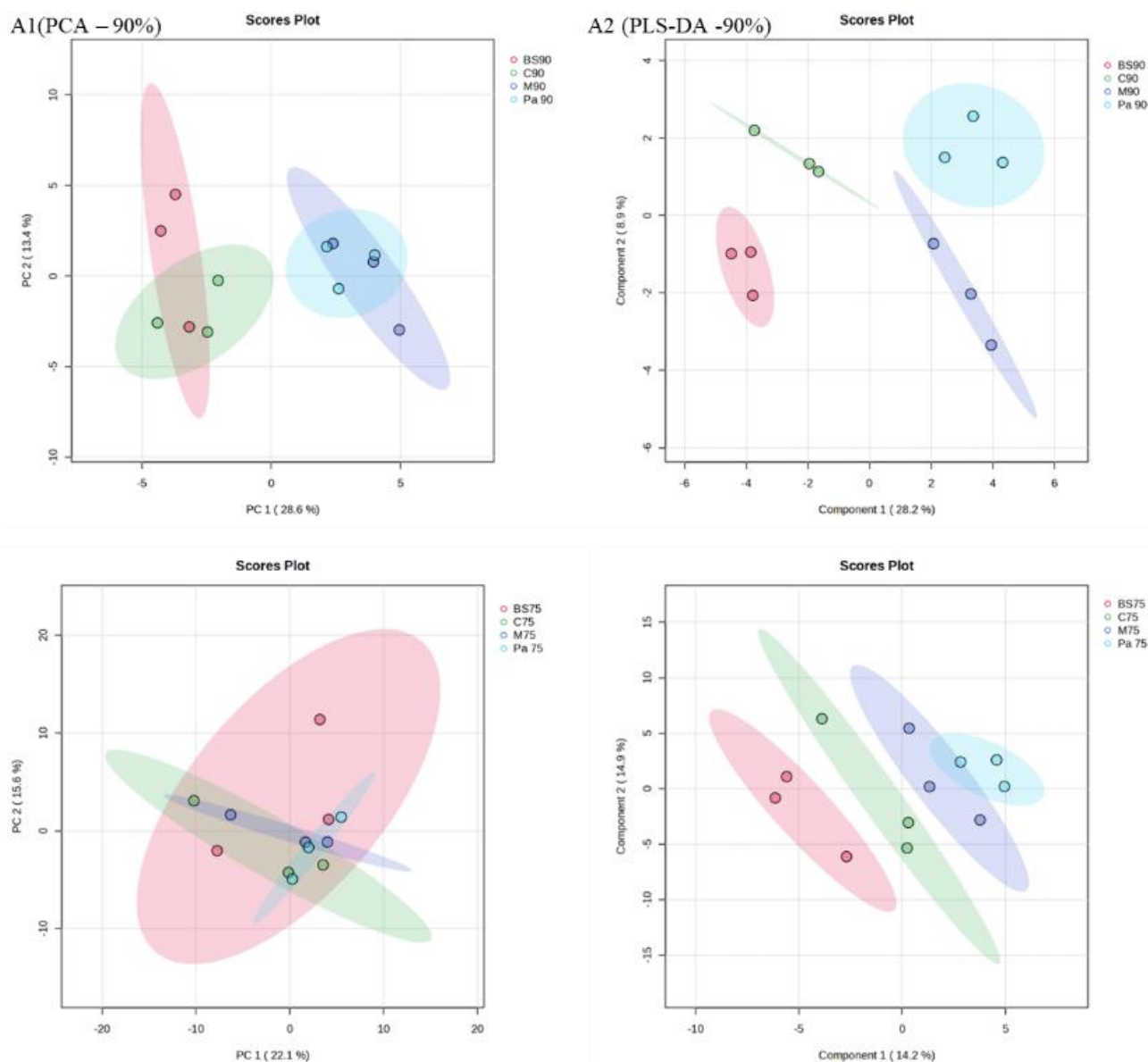


Figura 8. Análises multivariadas (PCA e PLS-DA) dos perfis metabólicos de alfaca cultivada sob diferentes intensidades (700 -A1 e A2 e 950 - B1 e B2) após inoculação com bioinsumos bacterianos. Os scores plots de PCA e PLS-DA foram obtidos a partir dos dados de GC-MS processados no software MZmine® e analisados no MetaboAnalyst®, utilizando transformação \log_{10} e autoescalamamento.

Fonte: Arquivo pessoal, 2025.

Por outro lado, em maior condição luminosidade $950 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ nota-se que os agrupamentos apresentam maior sobreposição entre os tratamentos, conforme evidenciado pela PCA (Figura. 8 B1 e B2). Essa menor separação pode estar relacionada à maior exposição do estresse luminoso, resultando em um metabolismo mais homogêneo entre as amostras, independentemente do bioinsumo aplicado. Ainda assim, o PLS-DA (Figuras 8 B2) revelou discriminação mais nítida entre os grupos, indicando que, mesmo sob maior luminosidade, os

tratamentos bacterianos influenciaram de forma significativa sob os perfis metabólicos das plantas.

O modelo PLS-DA mostrou-se adequado para diferenciar as amostras, confirmando as tendências observadas na PCA e reforçando a contribuição dos bioinsumos na modulação metabólica. A separação clara entre os grupos e a ausência de sobreposição significativa sugerem que os tratamentos resultaram em respostas químicas específicas, coerentes com a atuação diferencial das cepas bacterianas no cultivo da alface.

A maior separação dos grupos sob alta luminosidade $950 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ pode estar associada à intensificação de processos fotoquímicos e de defesa antioxidante, modulados pelas bactérias promotoras de crescimento.

É importante destacar que, em etapas posteriores, será realizada a análise e identificação dos *features* discriminantes obtidos a partir do modelo PLS-DA, com o objetivo de determinar quais metabólitos e vias metabólicas foram mais impactados pelos diferentes bioinsumos e pelas condições de luminosidade. Essa etapa permitirá compreender de forma mais aprofundada os mecanismos bioquímicos e fisiológicos envolvidos nas respostas das plantas, contribuindo para o entendimento do papel dos microrganismos promotores de crescimento na modulação do metabolismo vegetal em estudo.

5.2.3 Avaliação dos teores nutricionais em tecidos foliares e radiculares de Alface (*Lactuca sativa* L.) inoculada com bioinsumos em cultivo *indoor*.

As análises dos teores nutricionais realizadas no tecido foliar e sistema radicular de alface, foram conduzidas de forma individual visto que a interação entre intensidades luminosas e tratamentos bacterianos não apresentaram efeito significativo, os resultados apresentados referem-se ao efeito isolado dos tratamentos (Bactérias e Intensidades luminosas).

Para os macronutrientes avaliados (Tabela. 5), observou-se efeito significativo apenas para fósforo (P) ($p = 0,0041$). A consorcio apresentou o maior teor médio ($7,97 \text{ g kg}^{-1}$), estatisticamente semelhante aos tratamentos com *B. subtilis* UFV S1 e *P. aryabhattai* CCT 7986, logo o tratamento sem inoculação exibiu menor teor nutricional ($6,58 \text{ g kg}^{-1}$), diferenciando-se dos demais tratamentos. Os teores de K e Ca não foram influenciados pela

inoculação ($p > 0,05$), indicando ausência de resposta da cultura à aplicação microbiana para esses elementos.

Entre os micronutrientes, Cu e Mn não houve significância entre os tratamentos. Para Zn, houve efeito significativo ($p = 0,0149$) com *B. subtilis* UFV S1 resultando em maior teor foliar ($94,68 \text{ mg kg}^{-1}$), diferindo do consorcio ($75,21 \text{ mg kg}^{-1}$), enquanto os demais apresentaram valores intermediários.

Tabela 5 - Teores de macronutrientes (P, K e Ca) e micronutrientes (Cu, Mn e Zn) em folhas de alface submetidas a diferentes inoculações microbianas.

Inoculação microbiana	P	K	Ca
	g Kg ⁻¹		mg Kg ⁻¹
<i>Bacillus subtilis</i>	7,45 ± 0,55 a	39,07 ± 1,29 a	34,32 ± 3,74 a
<i>Priestia aryabhattai</i>	7,43 ± 0,55 a	39,95 ± 1,32 a	33,22 ± 3,62 a
Consortio	7,97 ± 0,59 a	40,05 ± 1,32 a	34,80 ± 3,79 a
Sem Inoculação	6,58 ± 0,49 b	40,24 ± 1,33 a	38,06 ± 4,14 a
F.V.	p-value		
Inoculação microbiana	0,0041**	0,4498 ^{ns}	0,1927 ^{ns}
C.V. (%)	7,47	3,32	10,90
Inoculação microbiana	Cu	Mn	Zn
	mg Kg ⁻¹		
<i>Bacillus subtilis</i>	5,36 ± 1,89 a	66,15 ± 30,9 a	94,68 ± 11,7 a
<i>Priestia aryabhattai</i>	2,88 ± 1,01 a	38,96 ± 18,2 a	81,07 ± 10,5 b
Consortio	4,48 ± 1,58 a	64,10 ± 29,5 a	75,21 ± 9,35 b
Sem Inoculação	4,23 ± 1,49 a	74,10 ± 34,6 a	93,52 ± 11,6 a
F.V.	p-value		
Inoculação microbiana	0,0721 ^{ns}	0,2039 ^{ns}	0,0149*
C.V. (%)	35,33	46,73	12,44

Legenda: Letras diferentes na coluna indicam diferença significativa pelo teste de Tukey. *Significativo ao nível de 5% pelo teste de Tukey; **Significativo ao nível de 1% teste de Tukey; ^{ns}Não significativo. F.V.: fonte de variação; C.V. (%): coeficiente de variação.

Para os teores de macronutrientes observados nas diferentes intensidades luminosas (Tabela. 6), observou-se efeito significativo apenas para fósforo (P) ($p = 0,001$). Plantas cultivadas sob $700 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ apresentaram maior teor foliar de P ($7,82 \text{ g kg}^{-1}$) em comparação àquelas sob $950 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ($6,89 \text{ g kg}^{-1}$). Os teores de K e Ca não foram influenciados pelas intensidades luminosas ($p > 0,05$), mantendo valores médios estatisticamente similares entre os tratamentos.

Entre os micronutrientes, não foram detectadas diferenças para Cu ($p = 0,3546$) e Mn ($p = 0,2775$). Contudo, verificou-se efeito significativo para Zn ($p = 0,0015$), com maiores teores foliares sob a faixa de $700 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ($94,48 \text{ mg}$

kg⁻¹), em comparação à faixa mais elevada de intensidade 950 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (77,76 mg kg⁻¹).

Tabela 6 - Teor nutricional foliar em função das intensidades luminosas. (PPFD) de 700 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e 950 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

Intensidades		P	K	Ca
		g Kg ⁻¹		mg Kg ⁻¹
700	$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	7,82 \pm 0,58 a	39,94 \pm 1,32 a	35,38 \pm 3,85 a
950	$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	6,89 \pm 0,51 b	39,71 \pm 1,31 a	34,82 \pm 3,79 a
F.V.		p-value		
Intensidades		0,001**	0,6705 ^{ns}	0,7238 ^{ns}
C.V. (%)		7,47	3,32	10,90
Intensidades		Cu	Mn	Zn
		mg Kg ⁻¹		
700	$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	3,95 \pm 1,39 a	67,35 \pm 31,4 a	94,48 \pm 11,7 a
950	$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	4,53 \pm 1,60 a	54,30 \pm 25,3 a	77,76 \pm 9,67 b
F.V.		p-value		
Intensidades		0,3546 ^{ns}	0,2775 ^{ns}	0,0015**
C.V. (%)		35,33	46,73	12,44

Legenda: Letras diferentes na coluna indicam diferença significativa pelo teste de Tukey. *Significativo ao nível de 5% pelo teste de Tukey; **Significativo ao nível de 1% teste de Tukey; ^{ns}Não significativo. F.V.: fonte de variação; C.V. (%): coeficiente de variação.

Os teores de P, K e Ca no sistema radicular da alface (Tabela. 7) não apresentaram diferenças significativas entre as inoculações microbianas ($p > 0,05$). Para os micronutrientes, observaram-se efeitos significativos das inoculações microbianas sobre os teores de Cu ($p = 0,0082$) e Mn ($p = 0,0147$).

O teor de Cu foi maior em plantas inoculadas com *B. subtilis* UFV S1 (14,69 mg kg⁻¹) e menor no consorcio (8,40 mg kg⁻¹). Para Mn, os maiores valores representaram em *B. subtilis* UFV S1 (23,73 mg kg⁻¹) e *P. aryabhattai* CCT 7986 (22,70 mg kg⁻¹), enquanto o menor teor foi observado na testemunha (13,40 mg kg⁻¹). Já os teores de Zn não apresentaram diferenças significativas.

Tabela 7 - Teores de macronutrientes e micronutrientes no sistema radicular de alface submetidas a diferentes inoculações microbianas.

Inoculação microbiana	P	K	Ca
	g Kg ⁻¹		mg Kg ⁻¹
<i>Bacillus subtilis</i>	6,49 ± 1,48 a	33,03 ± 4,30 a	34,64 ± 1,70 a
<i>Priestia aryabhatai</i>	6,96 ± 1,59 a	35,79 ± 4,85 a	33,96 ± 1,66 a
Consortio	6,76 ± 1,55 a	34,05 ± 4,61 a	34,04 ± 1,67 a
Sem Inoculação	5,50 ± 1,26 a	34,50 ± 4,67 a	34,60 ± 1,69 a
F.V.	p-value		
Inoculação microbiana	0,3548 ^{ns}	0,7802 ^{ns}	0,5296 ^{ns}
C.V. (%)	22,95	13,56	4,91
Inoculação microbiana	Cu	Mn	Zn
	mg Kg ⁻¹		
<i>Bacillus subtilis</i>	14,69 ± 3,60 a	23,73 ± 6,31 a	76,76 ± 16,2 a
<i>Priestia aryabhatai</i>	10,50 ± 2,57 b	22,70 ± 6,04 a	83,04 ± 17,5 a
Mix	8,40 ± 2,06 b	18,91 ± 5,03 a	71,60 ± 15,1 a
Sem Inoculação	12,94 ± 3,17 a	13,40 ± 3,56 b	65,49 ± 13,8 a
F.V.	p-value		
Inoculação microbiana	0,0082**	0,0147*	0,2902 ^{ns}
C.V. (%)	24,53	26,63	21,12

Legenda: Letras diferentes na coluna indicam diferença significativa pelo teste de Tukey.

*Significativo ao nível de 5% pelo teste de Tukey; **Significativo ao nível de 1% teste de Tukey;

^{ns}Não significativo. F.V.: fonte de variação; C.V. (%): coeficiente de variação.

As intensidades luminosas não influenciaram significativamente os teores de P ($p = 0,3046$) e Ca ($p = 0,8537$) no sistema radicular da alface (Tabela. 8). Para K, houve efeito significativo ($p = 0,001$), com maior teor observado na menor intensidade de 700 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ (40,57 mg kg⁻¹) em comparação às intensidades mais altas, de 950 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (28,11 mg kg⁻¹).

Quanto aos micronutrientes, observaram-se efeitos significativos das intensidades luminosas sobre Cu ($p = 0,0063$), Mn ($p = 0,0159$) e Zn ($p = 0,0025$). Para Cu, os maiores valores ocorreram na intensidade de 700 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (13,46 mg kg⁻¹), enquanto Zn e Mn apresentou padrão semelhante, sendo superior nessa mesma faixa de intensidade. Em intensidades mais elevadas, 900 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, os teores foram inferiores, atingindo 9,80 mg kg⁻¹ (Cu), 16,80 mg kg⁻¹ (Mn) e 65,77 mg kg⁻¹ (Zn).

Tabela 8 - Teor nutricional do sistema radicular em função das intensidades luminosas. (PPFD) de 700 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e 950 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

Intensidades	P	K	Ca
	g Kg ⁻¹		mg Kg ⁻¹
700 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	6,75 ± 1,54 a	40,57 ± 5,50 a	34,10 ± 1,67 a
950 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	6,11 ± 1,40 a	28,11 ± 3,81 b	34,23 ± 1,68 a
F.V.	p-value		
Intensidades	0,3046 ^{ns}	0,001 ^{**}	0,8537 ^{ns}
C.V. (%)	22,95	13,56	4,91
Intensidades	Cu	Mn	Zn
	mg Kg ⁻¹		
700 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	13,46 ± 3,30 a	22,57 ± 6,01 a	85,67 ± 18,0 a
950 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	9,80 ± 2,40 b	16,80 ± 4,47 b	65,77 ± 13,8 b
F.V.	p-value		
Intensidades	0,0063 ^{**}	0,0159 [*]	0,0025 ^{**}
C.V. (%)	24,53	26,63	21,12

Legenda: Letras diferentes na coluna indicam diferença significativa pelo teste de Tukey.
^{*}Significativo ao nível de 5% pelo teste de Tukey; ^{**}Significativo ao nível de 1% teste de Tukey; ^{ns}Não significativo. F.V.: fonte de variação; C.V. (%): coeficiente de variação.

5.3. Análises experimentais

5.3.1. Análises morfométricas das mudas de alface

Os dados da (Tabela. 9) demonstram os efeitos da microbiolização no desenvolvimento de mudas (Figura. 8), aos 20 Dias após a semeadura (DAS). Identificando diferenças significativas para diversas variáveis.



Figura 9. Desenvolvimento inicial das mudas de alface (*Lactuca sativa* L.) aos 20 dias após a semeadura. Onde: A (*Bacillus subtilis*), B (*Priestia aryabhattai*), C (consórcio de ambas) e D (tratamento controle). **Fonte:** Arquivo pessoal, 2025.

O número de folhas (NF 20) foi significativamente maior nos tratamentos com inoculação. Os tratamentos com *B. subtilis* UFV S1 (3,75), *P. aryabhattai* CCT 7986 (3,50) e o consorcio (3,75) não diferiram estatisticamente entre si, mas superaram o controle sem inoculação (2,37) ($p < 0,001$). Para o diâmetro do caule (DC 20) e a área foliar (AF 20), não houve diferença estatística significativa (p -values de 0,2107 e 0,6222, respectivamente).

O comprimento da raiz (CR 20) foi influenciado pela microbiolização. Os tratamentos com *B. subtilis* UFV S1 (9,87 cm), *P. aryabhattai* CCT 7986 (9,73 cm) e o consorcio (9,73 cm) apresentaram comprimentos de raiz significativamente maiores que o controle (6,26 cm) ($p < 0,001$).

Tabela 9 - Diâmetro do caule (DC 20), número de folhas (NF 20), área foliar (AF 20) e comprimento da raiz (CR 20), massa fresca da parte aérea (MFPA20), massa fresca da raiz (MFR20), massa seca da parte aérea (MSPA20) e massa seca da raiz (MSR20) das mudas aos 20 DAS.

Microbiolização	DC 20	NF 20	AF 20	CR 20
	mm	unitário	cm	
<i>Bacillus subtilis</i>	1,89 ± 0,40 a	3,75 ± 0,71 a	5,22 ± 2,17 a	9,87 ± 1,36 a
<i>Priestia aryabhattai</i>	1,74 ± 0,37 a	3,50 ± 0,67 a	4,12 ± 1,72 a	9,73 ± 1,34 a
Consortio	1,71 ± 0,37 a	3,75 ± 0,71 a	4,86 ± 2,02 a	9,73 ± 1,34 a
Sem Inoculação	1,49 ± 0,32 a	2,37 ± 0,45 b	4,21 ± 1,75 a	6,26 ± 0,86 b
F.V.	p-value			
Microbiolização	0,2107 ^{ns}	<0,001**	0,6222 ^{ns}	<0,001**
C.V. (%)	21,67	19,18	41,75	13,86
Microbiolização	MFPA 20	MSPA 20	MFR 20	MSR 20
	g ⁻¹		g ⁻¹	
<i>Bacillus subtilis</i>	0,34 ± 0,05 a	0,030 ± 0,04 ab	0,18 ± 0,03 a	0,0114 ± 0,016 a
<i>Priestia aryabhattai</i>	0,31 ± 0,04 ab	0,029 ± 0,04 ab	0,17 ± 0,03 ab	0,0112 ± 0,001 a
Consortio	0,35 ± 0,05 a	0,032 ± 0,05 a	0,20 ± 0,04 a	0,0110 ± 0,001 a
Sem Inoculação	0,26 ± 0,03 b	0,023 ± 0,03 b	0,13 ± 0,02 b	0,0086 ± 0,001 b
F.V.	p-value			
Microbiolização	0,034*	0,0093**	0,052*	0,0033**
C.V. (%)	15,04	16,01	20,21	14,28

Legenda: Letras diferentes na coluna indicam diferença significativa pelo teste de Tukey.

*Significativo ao nível de 5% pelo teste de Tukey; **Significativo ao nível de 1% teste de Tukey;

^{ns}Não significativo. F.V.: fonte de variação; C.V. (%): coeficiente de variação.

Todas as variáveis de biomassa apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos. A Massa Fresca da Parte Aérea (MFPA 20) foi maior nos tratamentos com *B. subtilis* UFV S1 (0,34 g) e consorcio (0,35 g), que diferiram do controle (0,26 g). Um padrão similar foi observado para a Massa Seca da

Parte Aérea (MSPA 20), onde estes mesmos tratamentos se sobressaíram em relação ao controle. A Massa Fresca da Raiz (MFR 20) e a Massa Seca da Raiz (MSR 20) foram significativamente maiores nos tratamentos inoculados. O controle (MFR 20 = 0,13 g; MSR 20 = 0,0086 g) foi superado por todos os demais tratamentos, com o consorcio (MFR 20 = 0,20 g) e o *B. subtilis* UFV S1 (MSR 20 = 0,0114 g) apresentando os maiores valores.

5.3.2. Análises morfométricas das plantas

A interação entre os fatores “bactérias e intensidades luminosas” não apresentou efeito significativo para nenhuma das variáveis morfométricas analisadas ($p > 0,05$) aos 23 DAT. A microbiolização exerceu efeitos distintos sobre as variáveis morfométricas e produtivas avaliadas. Para o diâmetro do caule (DC) não houve diferença significativa entre os tratamentos ($p > 0,05$), embora as plantas inoculadas tenham apresentado valores superiores em relação ao controle (Tabela. 10).

Tabela 10 - Variáveis morfométricas em função dos tratamentos bacterianos. Diâmetro do caule (DC 23), volume de raiz (VR 23), comprimento de raiz (CR 23), diâmetro da copa (DCP 23), número de folhas totais (NFT 23) e produtividade (PROD 23).

Microbiolização	DC 23 mm	VR 23 cm ⁻³	CR 23 cm
<i>Bacillus subtilis</i>	13,30 ± 1,58 a	23,16 ± 2,77 a	29,19 ± 3,46 a
<i>Priestia aryabhattai</i>	12,67 ± 1,50 a	21,00 ± 2,50 ab	28,66 ± 3,40 a
Consortio	12,83 ± 1,52 a	22,66 ± 2,70 a	32,00 ± 3,79 a
Sem Inoculação	10,98 ± 1,30 a	17,50 ± 2,08 b	19,83 ± 2,35 b
F.V.	p-value		
Microbiolização	0,073 ^{ns}	0,005**	0,001**
C.V. (%)	11,91	11,94	11,87
Microbiolização	DCP 23 cm	NFT 23 unitario	PROD 23 Kg ⁻¹ /m ³
<i>Bacillus subtilis</i>	24,76 ± 1,26 a	18,83 ± 1,43 a	4,60 ± 0,73 a
<i>Priestia aryabhattai</i>	24,75 ± 1,26 a	18,33 ± 1,39 a	4,81 ± 0,76 a
Consortio	25,33 ± 1,29 a	16,83 ± 1,28 a	4,33 ± 0,69 a
Sem Inoculação	20,50 ± 1,04 b	14,50 ± 1,10 b	3,66 ± 0,58 a
F.V.	p-value		
Microbiolização	0,001**	0,001**	0,0577 ^{ns}
C.V. (%)	5,12	7,63	16,00

Legenda: Letras diferentes na coluna indicam diferença significativa pelo teste de Tukey.

*Significativo ao nível de 5% pelo teste de Tukey; **Significativo ao nível de 1% teste de Tukey;

^{ns}Não significativo. F.V.: fonte de variação; C.V. (%): coeficiente de variação.

Por outro lado, tanto o volume radicular (VR) quanto o comprimento radicular (CR) responderam de forma significativa à microbiolização ($p < 0,01$). As inoculações com *B. subtilis* UFV S1, *P. aryabhattai* CCT 7986 e a mistura dos dois microrganismos proporcionaram maior crescimento radicular, diferindo da testemunha, que apresentou desempenho inferior nessas variáveis. Em relação ao diâmetro da copa (DCP) e o número de folhas totais (NFT) também foram significativamente influenciados pelos tratamentos ($p < 0,01$), com maiores valores associados à inoculação bacteriana, enquanto a ausência de inoculação resultou em menor desenvolvimento vegetativo.

Quanto à produtividade (PROD), não foi observada diferença estatisticamente significativa ($p = 0,0578$), embora os tratamentos bacterianos tenham se sobressaído sobre o tratamento controle. A microbiolização não promoveu diferenças significativas para massa fresca da parte aérea (MFPA), massa seca da parte aérea (MSPA), massa fresca radicular (MFR), massa seca radicular (MSR) e massa total (MT) ($p > 0,05$) (Tabela. 11).

Tabela 11 - Variáveis morfométricas em função dos tratamentos bacterianos. Massa fresca (MFPA 23) e seca da parte aérea (MSPA 23) e massa fresca (MFR 23) e seca das raízes (MSR 23) e massa total (MT 23).

Microbiolização	MFPA 23	MSPA 23	MFR 23
		g ⁻¹	
<i>Bacillus subtilis</i>	63,09 ± 10,09 a	6,30 ± 1,07 a	8,81 ± 2,13 a
<i>Priestia aryabhattai</i>	65,92 ± 10,54 a	6,59 ± 1,05 a	7,25 ± 1,75 a
Consorcio	59,44 ± 9,51 a	5,94 ± 0,94 a	7,87 ± 1,90 a
Sem Inoculação	50,23 ± 8,03 a	5,02 ± 0,80 a	7,07 ± 1,70 a
F.V.	p-value		
Microbiolização	0,0578 ^{ns}	0,0579 ^{ns}	0,3944 ^{ns}
C.V. (%)	16,00	15,99	24,18
Microbiolização	MSR 23	MT 23	
		g ⁻¹	
<i>Bacillus subtilis</i>	1,32 ± 0,32 a	7,63 ± 1,12 a	
<i>Priestia aryabhattai</i>	1,08 ± 0,26 a	7,68 ± 1,13 a	
Consorcio	1,18 ± 0,28 a	7,12 ± 1,04 a	
Sem Inoculação	1,06 ± 0,25 a	6,08 ± 0,89 a	
F.V.	p-value		
Microbiolização	0,3944 ^{ns}	0,0627 ^{ns}	
C.V. (%)	24,26	14,74	

Legenda: Letras diferentes na coluna indicam diferença significativa pelo teste de Tukey.

*Significativo ao nível de 5% pelo teste de Tukey; **Significativo ao nível de 1% teste de Tukey;

^{ns}Não significativo. F.V.: fonte de variação; C.V. (%): coeficiente de variação.

O fator intensidade luminosa não exerceu efeito significativo sobre as variáveis de diâmetro do caule (DC), volume radicular (VR) e comprimento radicular (CR) ($p > 0,05$) (Tabela. 12). Da mesma forma, não foram verificadas diferenças para o diâmetro da copa (DCP) e produtividade (PROD) ($p > 0,05$).

Por outro lado, o número de folhas totais (NFT) foi influenciado significativamente ($p < 0,05$), com aumento de (17,83%) observado na maior intensidade (PPFD) $950 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, em comparação a $700 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Figura. 10).

Tabela 12 - Variáveis morfométricas em função das intensidades luminosas. Diâmetro do caule (DC 23), volume de raiz (VR 23), comprimento de raiz (CR 23), diâmetro da copa (DCP 23), número de folhas totais (NFT 23) e produtividade (PROD 23). (PPFD) de $700 \mu\text{mol m}^{-2}$.

Intensidades	DC 23 mm	VR 23 cm^{-3}	CR 23 cm
$700 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	$12,63 \pm 1,50 \text{ a}$	$26,66 \pm 3,18 \text{ a}$	$28,50 \pm 3,38 \text{ a}$
$950 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	$12,27 \pm 1,46 \text{ a}$	$21,50 \pm 2,56 \text{ a}$	$26,33 \pm 3,12 \text{ a}$
F.V.	p-value		
Intensidades	$0,5606^{\text{ns}}$	$0,4292^{\text{ns}}$	$0,1223^{\text{ns}}$
C.V. (%)	11,91	11,94	11,87
Intensidades	DCP 23 cm	NFT 23 unitario	PROD 23 $\text{Kg}^{-1}/\text{m}^3$
$700 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	$24,00 \pm 1,22 \text{ a}$	$16,41 \pm 1,25 \text{ b}$	$4,23 \pm 0,67 \text{ a}$
$950 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	$23,66 \pm 1,21 \text{ a}$	$17,83 \pm 1,36 \text{ a}$	$4,47 \pm 0,71 \text{ a}$
F.V.	p-value		
Intensidades	$0,5025^{\text{ns}}$	$0,0175^*$	$0,4154^{\text{ns}}$
C.V. (%)	5,12	7,63	16,00

Legenda: Letras diferentes na coluna indicam diferença significativa pelo teste de Tukey. *Significativo ao nível de 5% pelo teste de Tukey; **Significativo ao nível de 1% teste de Tukey; ^{ns}Não significativo. F.V.: fonte de variação; C.V. (%): coeficiente

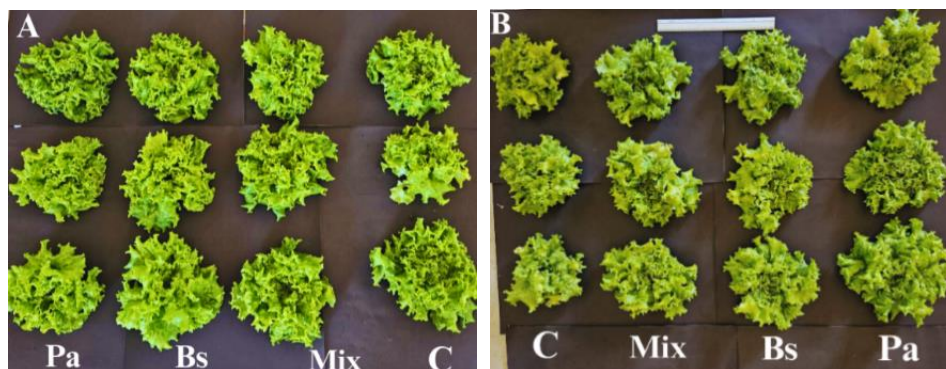


Figura 10. Aspecto visual das plantas de alface crespa (var. Itapuã Super) aos 23 dias após o transplante. A: $700 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e B: $950 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, com variação nos tratamentos e as intensidades. **Fonte:** Arquivo pessoal, 2025.

A variação das intensidades luminosas não resultou em diferenças significativas para a massa fresca da parte aérea (MFPA), massa seca da parte aérea (MSPA) e massa total (MT) a 5% de significância (Tabela. 13).

Entretanto, observou-se que a massa fresca radicular (MFR) e a massa seca radicular (MSR) foram significativamente superiores sob intensidades maiores (PPFD) 950 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ em comparação a de 700 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ ($p < 0,01$), evidenciando maior estímulo ao crescimento radicular em condições de maior intensidade luminosa.

Tabela 13 - Variáveis morfométricas em função das intensidades luminosas. Massa fresca (MFPA 23) e seca da parte aérea (MSPA 23) e massa fresca (MFR 23) e seca das raízes (MSR 23) e massa total (MT 23). (PPFD) de 700 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e 950 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

Intensidades	MFPA 23	MSPA 23	MFR 23
	g ⁻¹		
700 μmol m ⁻² s ⁻¹	58,04 ± 9,28 a	5,80 ± 0,92 a	6,32 ± 1,52 b
950 μmol m ⁻² s ⁻¹	61,30 ± 9,80 a	6,13 ± 0,98 a	9,18 ± 2,21 a
F.V.	p-value		
Intensidades	0,4155 ^{ns}	0,4153 ^{ns}	0,0018 ^{**}
C.V. (%)	16,00	15,99	24,18
Intensidades	MSR 23	MT 23	
	g ⁻¹		
700 μmol m ⁻² s ⁻¹	0,94 ± 0,22 a	6,75 ± 0,99 a	
950 μmol m ⁻² s ⁻¹	1,37 ± 0,33 b	7,50 ± 1,10 a	
F.V.	p-value		
Intensidades	0,0018 ^{**}	0,0966 ^{ns}	
C.V. (%)	24,26	14,74	

Legenda: Letras diferentes na coluna indicam diferença significativa pelo teste de Tukey. *Significativo ao nível de 5% pelo teste de Tukey; **Significativo ao nível de 1% teste de Tukey; ^{ns}Não significativo. F.V.: fonte de variação; C.V. (%): coeficiente de variação.

5.3.3. Análises fisiológicas das plantas.

A interação entre os fatores não exerceu efeito estatisticamente significativo ($p > 0,05$) para as variáveis fisiológicas de clorofila a, b e total aos 23 DAT (Tabela. 14). Esse resultado evidencia que os fatores avaliados atuaram de forma independente, sem promover efeitos combinados sobre as variáveis estudadas.

As inoculações apresentaram efeito significativo sobre os teores de clorofila a, b e total ($p < 0,05$). A inoculação com *P. aryabhattai* CCT 7986

promoveu o maior acúmulo de pigmentos para clorofila *a*, clorofila *b* e para clorofila total. Em contraste, a ausência de inoculação resultou nos menores valores.

Tabela 14 - Teores de clorofila “a”, clorofila “b”, e total em função dos tratamentos bacterianos.

Variáveis	Clorofila “a”	Clorofila “b”	Clorofila Total
	$\mu\text{g g}^{-1}$ planta		
<i>Bacillus subtilis</i>	20,86 \pm 4,90 ab	4,76 \pm 1,94 ab	25,71 \pm 6,51 ab
<i>Priestia aryabhatai</i>	22,50 \pm 5,28 a	6,22 \pm 2,54 a	28,76 \pm 7,29 a
Consorcio	19,90 \pm 4,67 ab	5,28 \pm 2,16 ab	25,22 \pm 6,39 ab
Sem Inoculação	17,41 \pm 4,09 b	3,92 \pm 1,60 b	21,37 \pm 5,41 b
F.V.	p-value		
Variáveis	0,0177*	0,0129*	0,0109*
C.V. (%)	23,51	40,94	25,35

Legenda: Letras diferentes na coluna indicam diferença significativa pelo teste de Tukey.

*Significativo ao nível de 5% pelo teste de Tukey; **Significativo ao nível de 1% teste de Tukey;

^{ns}Não significativo. F.V.: fonte de variação; C.V. (%): coeficiente de variação.

Os tratamentos com *B. subtilis* UFV S1 e com a combinação das duas bactérias apresentaram desempenhos intermediários, estatisticamente semelhantes entre si e não apresentando diferença entre os tratamentos. As intensidades testadas, (PPFD) de 700 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e 950 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ não apresentaram diferenças significativas entre para os teores de clorofila *a*, *b* e total ($p > 0,05$) (Tabela. 15). Os tratamentos apresentaram médias semelhantes, indicando que a variação do espectro luminoso avaliado não exerceu influência sobre a síntese de pigmentos fotossintéticos nas plantas.

Tabela 15 - Teores de clorofila “a”, clorofila “b” e total em função das intensidades luminosas. (PPFD) de 700 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e 950 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

Intensidades	Clorofila “a”	Clorofila “b”	Clorofila Total
	$\mu\text{g g}^{-1}$ planta		
700 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	19,86 \pm 4,66 a	4,75 \pm 1,94 a	24,65 \pm 6,24 a
950 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	20,48 \pm 4,81 a	5,35 \pm 2,19 a	25,88 \pm 6,56 a
F.V.	p-value		
Intensidades	0,5831 ^{ns}	0,2207 ^{ns}	0,4191 ^{ns}
C.V. (%)	23,51	40,94	25,35

Legenda: Letras diferentes na coluna indicam diferença significativa pelo teste de Tukey.

*Significativo ao nível de 5% pelo teste de Tukey; **Significativo ao nível de 1% teste de Tukey;

^{ns}Não significativo. F.V.: fonte de variação; C.V. (%): coeficiente de variação.

5.4. DISCUSSÃO

5.4.1. Inoculação microbiana e processo germinativo das sementes de alface

Os resultados evidenciam que a inoculação de sementes com as bactérias promotoras de crescimento *B. subtilis* e *P. aryabhattai*, pode melhorar significativamente a porcentagem de germinação. O aumento observado na germinação, especialmente com o tratamento de *B. subtilis*, é um indicador do potencial desses microrganismos em otimizar as primeiras fases do desenvolvimento vegetal.

Os efeitos positivos de *B. subtilis* sobre sementes são atribuídos a diferentes mecanismos de promoção de crescimento, como produção de fitormônios e solubilização de fósforo, além da inibição de microrganismos patogênicos por antibióticos e lipopeptídeos e síntese de sideróforos (Tsotetsi et al., 2022).

Tais mecanismos atuam de forma sinérgica para acelerar a quebra de dormência fisiológica e melhorar a eficiência metabólica da germinação. Em culturas hortícolas, o uso de *Bacillus* tem mostrado resultados consistentes, com incremento de biomassa e maior uniformidade de emergência, o que reforça os dados aqui apresentados (Pagliarini et al., 2023).

Em outro trabalho, Pagliarini et al. (2023) testou uma nova estirpe de *Bacillus* sp. VWC18, em substrato no cultivo de alface e manjeriço, aplicando-se em diferentes concentrações (10^{-3} a 10^{-9} UFC mL⁻¹) e frequências de aplicação. Eles observaram que essa cepa promoveu o dobro ou até o triplo da massa radicular e aumentos expressivos na absorção de nutrientes nas plantas tratadas. Esse uso explícito da cepa VWC18 é importante para comparação, mostrando que os efeitos benéficos observados no estudo atual estão alinhados com os obtidos pela estirpe de *Bacillus* em condições semelhantes.

Com relação a *P. aryabhattai*, estudos recentes têm evidenciado seu potencial como bactéria promotora de crescimento, sobretudo pela produção de auxinas, pela solubilização de fósforo e pela indução de tolerância a estresses (Shahid et al., 2022). Deng et al. (2022) destacam que a espécie possui mecanismos moleculares importantes na promoção do crescimento vegetal, embora os efeitos variem de acordo com a cepa e as condições ambientais.

Por outro lado, Xu et al. (2022), utilizando a cepa B8W22 de *P. aryabhatai* demonstrando que ela secreta diversos ácidos orgânicos (oxálico, málico, cítrico, succínico), reforçando seu potencial para estimular crescimento vegetal. No qual diferentes cepas de *P. aryabhatai* podem atuar como promotoras de crescimento em diversas culturas.

Assim, bactérias do gênero *Bacillus* e de espécies relacionadas como *P. aryabhatai* podem atuar na promoção do crescimento em hortaliças. A microbiolização pode ser considerada uma alternativa viável para melhorar o desempenho inicial das plantas, reduzir perdas na fase de germinação e potencializar o rendimento em sistemas de cultivo (Kloetzner et al., 2021; Patel et al., 2020).

5.5. Ensaios laboratoriais

5.5.1 Quantificação de células viáveis de *Bacillus subtilis* UFV S1 e *Priestia aryabhatai* CCT 7986 em cultivo indoor

O maior número de células viáveis antes da inoculação encontrado em *B. subtilis* e seguido pelo tratamento com *P. aryabhatai* e do consorcio bacteriano, em relação ao controle, evidenciam maior robustez de *B. subtilis* no estabelecimento da microbiota associada às sementes, indicando seu potencial de colonização e persistência.

Essa diferença entre espécies bacterianas encontra respaldo nas análises taxonômicas de Gupta et al. (2020), que, por meio de filogenômica e análise comparativa de mais de 300 genomas de Bacillaceae, reclassificaram diversas linhagens de *Bacillus* em 17 novos gêneros, incluindo a confirmação de *Priestia* como gênero independente.

Esse trabalho mostrou que, embora *B. subtilis* permaneça no chamado clado Subtilis, *P. aryabhatai* se agrupa em um clado distinto, com assinaturas moleculares próprias. Essa redefinição não é apenas taxonômica: ela implica diferenças fisiológicas e metabólicas que influenciam como cada gênero responde a fatores ambientais e interage com as plantas.

Nesse sentido, a maior viabilidade celular observada em *B. subtilis* pode estar ligada à sua longa adaptação como espécie modelo em ambientes variados, enquanto *P. aryabhatai* apresenta desempenho mais moderado em

sementes, mas pode revelar vantagens em condições específicas de estresse ou solos com baixa qualidade agronômica.

Relacionando com o contexto de *vertical farming*, Farhangi et al. (2023) identificaram que múltiplos fatores, como a temperatura do ar, temperatura noturna, umidade relativa, intensidade da luz e condutividade elétrica da solução nutritiva, interagem de forma complexa, sendo possível prever o crescimento de alface e manjerição com erro de apenas 1–3%.

Isso mostra que a performance de bactérias como *B. subtilis* e *P. aryabhattai* pode variar conforme o “microclima” controlado em cada vertical, já que mudanças sutis em luz, temperatura e nutrientes afetam não apenas as plantas, mas também a atividade microbiana.

Contudo Jin et al. (2023), evidenciou que a eficiência do uso da luz incidente atinge valores médios de 0,55 g/mol em *vertical farming*, superiores a estufas (0,39 g/mol) e campo (0,23 g/mol). Em alguns casos, essa eficiência chegou a 1,63 g/mol, próxima ao limite teórico de conversão da fotossíntese. Esses resultados indicam que o ambiente de *vertical farming* oferece condições altamente otimizadas para o crescimento vegetal, o que também pode favorecer bactérias mais robustas, como *B. subtilis*, que apresentam maior viabilidade inicial e capacidade de colonização estável.

Portanto, é possível afirmar que a maior viabilidade celular de *B. subtilis* sugere um potencial de desempenho superior em sistemas de cultivo vertical. Isso ocorre porque o ambiente controlado não apenas otimiza a fisiologia da planta, mas também cria um microclima favorável para bactérias mais adaptáveis, consolidando a microbiolização como estratégia promissora para integrar o uso de bioinsumos.

A ausência de diferença significativa no número de células viáveis para as possíveis intensidades avaliadas sugere que, no intervalo testado, a intensidade luminosa não influenciou diretamente a sobrevivência das bactérias associadas às sementes.

Esse resultado contrasta com Carotti et al. (2021), que identificaram forte interação entre intensidade luminosa e temperatura radicular no crescimento da alface, evidenciando que a luz exerce papel crítico sobre a fisiologia vegetal. Contudo, no caso do tratamento microbiano, a ausência de efeito estatístico sugere que as bactérias podem manter sua viabilidade em uma faixa

relativamente ampla de luminosidade, o que é coerente com a revisão de Chiaranunt e White (2023), que destacam a resiliência de bactérias promotoras de crescimento de plantas em ambientes controlados.

Além disso, estudos como os de Farhangi et al. (2023) mostram que as diferentes intensidades, combinados a fatores como condutividade elétrica e temperatura, exercem papel mais relevante que apenas a variação de intensidade de luz. Assim, a manutenção da viabilidade bacteriana tanto em maior intensidade quanto em menor, reforça a ideia de que a inoculação pode ser eficaz em diferentes cenários de cultivo.

A persistência das bactérias variou conforme o tipo de intensidade. Sob menor intensidade ($700 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), *P. aryabhatai* demonstrou maior viabilidade celular em comparação ao tratamento sem inoculação, sugerindo melhor adaptação dessa espécie às condições proporcionadas por esse tipo de iluminação. Por outro lado, na intensidade mais elevada ($950 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), o comportamento foi inverso, com *P. aryabhatai* apresentando menor sobrevivência, evidenciando que o microrganismo responde de maneira distinta às intensidades luminosas.

Esses resultados indicam que a interação entre a espécie bacteriana e o espectro de luz exerce papel determinante na persistência microbiana após a reinoculação, possivelmente relacionada a diferenças fisiológicas e metabólicas na resposta à intensidade e qualidade da luz.

Gupta et al. (2020), que destacou diferenças fisiológicas e metabólicas entre *Bacillus* e *Priestia*, no qual o desempenho superior de *P. aryabhatai* sob menor intensidade reforça sua versatilidade e capacidade de adaptação, respondendo melhor a condições de menor intensidade luminosa, possivelmente refletindo estratégias distintas de colonização e sobrevivência.

Estudos de Wicharuck et al. (2024) ajudam a interpretar esse comportamento, onde observam que diferentes níveis de prateleiras, sujeitos a variação natural de luz, resultaram em alterações significativas no peso fresco das plantas, sendo que níveis inferiores apresentaram maior biomassa. De modo semelhante, as bactérias também respondem de forma diferenciada ao ambiente luminoso, como a *Priestia* exibindo maior viabilidade em condições de menor intensidade.

Além disso, Jin et al. (2023) demonstrou que a eficiência do uso da luz em sistemas verticais pode atingir valores próximos ao limite teórico. Isso sugere que, ao otimizar os espectros e intensidades, não apenas as plantas, mas também as bactérias inoculadas podem ter sua performance potencializada, integrando a microbiolização e manejo de luz em sistemas controlados.

5.5.2. Avaliação do perfil metabólico de Alface (*Lactuca sativa* L.) inoculada com bioinsumos em cultivo *indoor*

A análise de componentes principais (PCA) e a análise discriminante por mínimos quadrados parciais (PLS-DA) indicaram que os bioinsumos bacterianos influenciaram significativamente o metabolismo das plantas de alface sob diferentes intensidades luminosas.

Essa diferenciação sugere que *P. aryabhattai* e o consorcio em condições de menor intensidade ($700 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), induziram alterações metabólicas mais amplas ou mais específicas em rotas secundárias e de estresse, comparativamente ao efeito mais moderado de *B. subtilis* naquela condição. A modulação de perfis de metabólitos secundários e primários por inoculação bacteriana foram observados em estudos de metabolômica foliar e radicular de alface, que apresentam grande plasticidade metabólica em resposta a tratamentos microbianos (Baiyin et al., 2024).

Em contrapartida em maior intensidade ($950 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) a PCA indicou maior sobreposição entre tratamentos, embora o PLS-DA por ser um método supervisionado ainda discriminasse os grupos. Essa padronização metabólica aparente sob luz intensa pode ser explicada pela ativação generalizada de vias foto-protectoras e antioxidantes (ex. carotenoides, flavonoides, sistemas enzimáticos) que “nivelam” parte da variabilidade induzida pelos inoculantes; entretanto, diferenças específicas entre tratamentos permanecem detectáveis por modelos supervisionados (Khoso; Wagan et al., 2024).

A interação observada entre intensidade luminosa e ao inoculante corrobora a visão de que a eficácia e o modo de ação dos bioinsumos, podem ser dependentes do contexto ambiental. Os microrganismos modulam nutrição, síntese hormonal, via de defesa e tolerância a estresses abióticos, efeitos esses que podem apresentar magnitude e natureza distintas conforme variáveis

ambientais como luz, disponibilidade de nutrientes, estresse hídrico (Khoso; Wagan et al., 2024).

Além disso, estudos específicos com *P. aryabhattai* indicam capacidade desta espécie em alterar processos relacionados à disponibilidade de fósforo e interações solo-planta, evidenciando potencial fisiológico que pode se refletir também em modulações metabólicas (Yang et al., 2024).

Em síntese, os resultados suportam que *P. aryabhattai* e o consorcio têm potencial para modular o metaboloma da alface. Assim, bioinsumos bacterianos exercem efeito mensurável sobre o metaboloma da alface, variando com a mudança da intensidade de luz incidente.

5.5.3. Avaliação dos teores nutricionais em tecidos foliares e radiculares de Alface (*Lactuca sativa* L.) inoculada com bioinsumos em cultivo *indoor*

Os resultados obtidos demonstram que a inoculação com *B. subtilis* e o consorcio microbiano promoveu aumento significativo nos teores foliares de fósforo (P), especialmente no consorcio, sugerindo maior solubilização e disponibilização deste nutriente às plantas.

Esse comportamento é coerente com estudos que apontam *B. subtilis* como eficaz promotora de crescimento vegetal, aumentando a absorção de macronutrientes em alface por meio da produção de ácidos orgânicos, sideróforos e estímulo ao desenvolvimento radicular (Oliveira et al., 2023). Em estudos com *P. aryabhattai* também demonstraram sua capacidade de aumentar a fracionamento de fósforo disponível no solo, resultando em maior absorção pelas raízes e incremento do teor de P nas partes aéreas (Wang et al., 2023).

Resultados semelhantes também foram relatados por Bicudo, Teischmann e Jardini (2023), que observaram incremento nos teores foliares de P em alface após a associação entre adubação fosfatada e microrganismos solubilizadores de fosfato.

A variação nos teores foliares e radiculares de Cu, Mn e Zn em função da inoculação pode estar relacionada à capacidade das rizobactérias de alterar a disponibilidade e mobilidade de micronutrientes na rizosfera. De acordo com Machado (2021), bactérias promotoras de crescimento atuam sobre a dinâmica de micronutrientes por meio da produção de sideróforos e compostos quelantes,

aumentando a solubilidade de íons metálicos e favorecendo seu transporte pelas raízes.

Esse mecanismo pode explicar, por exemplo, os maiores teores de Cu e Mn nos tratamentos inoculados com *B. subtilis*, como observado neste estudo, ao mesmo tempo em que o consorcio pode ter reduzido o teor de Zn por possíveis interações competitivas entre íons ou pelas próprias cepas microbianas, padrão também observado em ensaios de inoculação múltipla descritos por Rodrigues (2024).

A intensidade luminosa também apresentou efeito marcante sobre o acúmulo de nutrientes. As plantas cultivadas sob menor intensidade ($700 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) de luz apresentaram maiores teores de Cu, Mn e Zn, enquanto intensidades mais elevadas reduziram a concentração desses micronutrientes. Esse fenômeno pode ser interpretado como um possível “efeito de diluição”, no qual a maior taxa fotossintética e acúmulo de biomassa sob maior irradiância não é acompanhado por absorção proporcional de micronutrientes, levando à redução das concentrações teciduais padrão já descrito em estudos com alface sob diferentes condições ambientais (Oliveira et al., 2023).

Além disso, a modulação da luz pode alterar a expressão de genes relacionados ao transporte de nutrientes e a redistribuição iônica no interior da planta, influenciando diretamente o equilíbrio entre o desenvolvimento da parte aérea e das raízes. Evidências recentes demonstram que diferentes espectros luminosos regulam mecanismos fisiológicos associados ao metabolismo nutricional da alface, afetando tanto o acúmulo quanto o movimento de íons nos tecidos vegetais (Soufi et al., 2023).

Assim, a integração entre inoculação microbiana e intensidade luminosa pode constituir estratégia eficiente para maximizar o desempenho nutricional e fisiológico da cultura.

5.6. Análises experimentais

5.6.1 Análises morfométricas das mudas de alface

A inoculação de microrganismos promoveu efeitos positivos no crescimento e na biomassa da alface, os tratamentos contendo inóculos bacterianos apresentaram melhor desempenho em comparação ao tratamento sem inoculação. Esses resultados corroboram os achados de Oliveira et al.

(2023), que observaram aumento significativo na produção de biomassa e no número de folhas de alface cultivada em sistema hidropônico após inoculação com *B. subtilis*, atribuindo o efeito à produção de fitormônios e à melhora da absorção de nutrientes.

De forma semelhante, Sarti et al. (2023) relataram que a inoculação de alface com biofilme de *B. subtilis* promoveu maior crescimento vegetativo e acúmulo de matéria seca, resultado relacionado à produção de ácido indolacético (AIA) e à colonização efetiva da rizosfera. Esses mecanismos explicam o desempenho superior dos tratamentos inoculados neste estudo, uma vez que *Bacillus* spp. são amplamente reconhecidos por estimular o desenvolvimento radicular, aumentar a área foliar e melhorar a eficiência fotossintética (Kasozi et al., 2021).

A *P. aryabhattai* também apresentou efeito positivo sobre as variáveis avaliadas, com resultados comparáveis aos obtidos com *B. subtilis*. Esse comportamento pode estar associado à capacidade dessa bactéria em modular o metabolismo vegetal e solubilizar nutrientes essenciais, conforme descrito por Deng et al. (2022), que observaram que *P. aryabhattai* promoveu crescimento em diferentes espécies vegetais por meio da produção de sideróforos, enzimas antioxidantes e fitormônios. Além disso, Wang et al. (2024) destacaram que *P. aryabhattai* melhora o ambiente rizosférico e favorece o desenvolvimento radicular, o que reforça seu potencial como bioinoculante para hortaliças.

O consórcio apresentou desempenho semelhante ou ligeiramente superior aos tratamentos individuais, sugerindo uma possível interação complementar entre as espécies. Estudos com consórcios de rizobactérias promotoras de crescimento em alface indicam que a combinação de diferentes microrganismos pode gerar efeitos sinérgicos, otimizando a disponibilidade de nutrientes e a tolerância a estresses (Pagliarini et al., 2022).

Os resultados obtidos reforçam que a microbiolização com *B. subtilis* e *P. aryabhattai* influencia positivamente o crescimento da alface, sobretudo nas variáveis relacionadas ao desenvolvimento radicular. Esses efeitos podem estar associados a múltiplos mecanismos fisiológicos, como maior produção de auxinas, melhoria na assimilação de fósforo e incremento na atividade fotossintética, além de efeitos indiretos sobre a microbiota da rizosfera (Oliveira et al., 2023; Sarti et al., 2023; Deng et al., 2022).

O potencial de uso de *B. subtilis* e *P. aryabhattai* como bioinoculantes na cultura da alface, apontam o papel dessas bactérias na promoção de crescimento vegetal, na eficiência fisiológica e na sustentabilidade dos sistemas de cultivo protegidos e hidropônicos (Wang et al., 2024; Pagliarini et al., 2022).

5.6.2 Análises morfométricas das plantas

A microbiolização exerceu influência significativa sobre variáveis estruturais e produtivas da alface, apresentando desempenho superior em relação à testemunha não inoculada, indicando que a presença das rizobactérias favoreceu o desenvolvimento vegetal de forma consistente.

Segundo Sarti et al. (2023), a inoculação de *B. subtilis* em *Lactuca sativa* promove maior crescimento radicular devido à produção de ácido indolacético (AIA), que estimula o alongamento das raízes e melhora a absorção de água e nutrientes. Essa maior eficiência radicular também foi observada por Oliveira et al. (2023), que relataram incremento no volume radicular e na taxa de assimilação de CO₂ em plantas de alface cultivadas com *B. subtilis* em sistema hidropônico, refletindo em maior vigor e desempenho fisiológico.

Esse desempenho se alinha ao relatado por Wicharuck et al. (2024), que observaram maior peso fresco em níveis médios e inferiores de prateleiras em cultivos verticais, evidenciando que a manipulação do ambiente luminoso pode potencializar o rendimento da cultura. Da mesma forma, Jin et al. (2023) mostraram que a eficiência do uso da luz em vertical farms alcança valores até três vezes superiores aos sistemas convencionais, o que sugere que a combinação de manejo de luz com microbiolização pode maximizar não apenas os parâmetros de crescimento, mas também a produtividade.

Embora a produtividade total (PROD) não tenha apresentado diferença estatisticamente significativa, observa-se aumento nos tratamentos inoculados.

Estudos recentes apontam que, em condições controladas com ajustes simultâneos em espectros, temperatura e condutividade e o efeito dos microrganismos pode manifestar-se de forma mais pronunciada em parâmetros fisiológicos e morfológicos antes de se refletir diretamente no rendimento final (Kasozzi et al., 2021). Ainda assim, o incremento em variáveis estruturais, como diâmetro de copa e número de folhas, sugere maior potencial produtivo.

A microbiolização com *B. subtilis* e *P. aryabhattai* contribui para o aprimoramento do desenvolvimento vegetativo e radicular da alface, reforçando evidências de que essas espécies atuam como importantes promotoras de crescimento vegetal. Tais efeitos podem estar relacionados a mecanismos fisiológicos, bioquímicos e ecológicos, que incluem produção de fitormônios, aumento na eficiência de absorção de nutrientes e melhoria na estrutura da rizosfera (Oliveira et al., 2023; Deng et al., 2022; Wang et al., 2024).

Foi observado também que a microbiolização com *B. subtilis* e *P. aryabhattai* promoveu maiores valores de massa fresca da parte aérea, em comparação ao tratamento sem inoculação. Tendência semelhante ocorreu para massa seca da parte aérea e massa fresca das raízes, ainda que sem diferenças estatísticas significativas. Para massa seca das raízes (MSR 23) e massa total (MT 23), os valores apresentaram tendência numérica de aumento nos tratamentos bacterianos em relação ao controle, porém sem diferença estatisticamente significativa.

De acordo com Khan et al. (2020), que relataram incremento em biomassa aérea e radicular de alface pela inoculação com *B. subtilis*, atribuindo os efeitos à produção de auxinas e solubilização de fósforo. Além disso, destacam que microrganismos promotores de crescimento frequentemente apresentam respostas mais consistentes em parâmetros de biomassa aérea do que em raízes, devido à maior disponibilidade de nutrientes e estímulo hormonal direcionado às partes fotossintéticas.

A (Tabela 12) mesmo não apresentando diferenças significativas em diâmetro do caule, volume e comprimento de raiz entre as intensidades $700 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e $950 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Sugere que a variação na intensidade luminosa não foi suficiente para promover alterações estruturais expressivas no sistema radicular ou no desenvolvimento do caule.

Por outro lado, o número total de folhas apresentou incremento sob a maior intensidade $950 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, indicando que a maior proximidade das fontes luminosas favoreceu a expansão foliar, possivelmente em decorrência do aumento da intensidade de radiação incidente e da consequente elevação na taxa fotossintética.

Segundo Ma et al. (2021), os efeitos dos espectros de luz sobre o crescimento vegetal dependem fortemente da composição espectral, intensidade luminosa e espécie cultivada, podendo influenciar desde a morfologia até o acúmulo de biomassa. Em linha semelhante, Zhang et al. (2021) relataram que diferentes intensidades modulam de forma diferenciada a alocação de biomassa em alface, com maior produção foliar em intensidades moderadas e maior alongamento radicular sob intensidades mais altas.

No entanto, conforme também relatado por Khan et al. (2023), o aumento no número de folhas nem sempre se traduz em maior produtividade total, visto que o incremento de folhas pode ocorrer às custas da redução no peso médio de cada unidade, devido à competição interna por assimilados. Esse comportamento é consistente com os dados observados, em que houve aumento no NFT sem acréscimo significativo na produtividade.

Notou-se que a intensidade luminosa não afetou significativamente a (MFPA e MSPA), mas influenciou o sistema radicular. O tratamento com maior intensidade apresentou maior massa fresca e seca das raízes, em comparação ao com menor intensidade. Essa diferença demonstra que intensidades de luz podem favorecer a alocação de assimilados para as raízes, promovendo maior robustez no sistema subterrâneo.

O espectro luminoso exerce forte influência sobre a arquitetura e o metabolismo radicular. Tang et al. (2022) demonstraram que intensidades moderadas de luz podem induzir maior partição de fotoassimilados para as raízes, estimulando a expansão radicular e a formação de tecidos de reserva.

A maior massa radicular em intensidade mais alta $950 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, sugere uma adaptação fisiológica favorável à absorção de nutrientes, o que pode refletir em maior eficiência no uso de água e fertilizantes. Essa resposta pode estar associada ao balanço hormonal modulado pela luz, especialmente na síntese de auxinas e citocininas. De acordo com Chen et al. (2023), a proporção de luz vermelha e azul regula o transporte de auxinas da parte aérea para a raiz, influenciando o crescimento radicular e a diferenciação tecidual.

Raízes mais desenvolvidas podem atuar como reservatórios de carboidratos e contribuir para a resiliência das plantas frente a variações de temperatura ou estresse osmótico devido sua maior absorção de nutrientes com raízes em maior profundidade. Esse efeito ganha relevância em sistemas

controlados, onde a condutividade elétrica da solução nutritiva e a recirculação hídrica são fatores críticos, como enfatizado por Farhangi et al. (2023).

5.6.3. Análises fisiológicas das plantas

Os resultados obtidos neste trabalho para o teor de clorofilas “a”, “b” e total indicaram efeito significativo dos tratamentos de microbiolização bacteriana, promovendo aumentos significativos nos teores de pigmentos fotossintéticos.

A elevação no teor de clorofila sugere maior capacidade de captura de luz e eficiência fotossintética, fatores diretamente relacionados ao acúmulo de biomassa. O aumento dos teores de clorofila observado no tratamento com *P. aryabhatai* pode estar relacionado à sua elevada capacidade de promover solubilização de fosfatos e fixação biológica de nitrogênio. Esses mecanismos contribuem para maior assimilação de nutrientes e intensificação da atividade fotossintética (Deng et al., 2022).

Além disso, a presença dessas bactérias na rizosfera pode induzir a expressão de genes ligados à fotossíntese *psbA* e *psbD* (complexo do fotossistema II), e *LHCA/LHCB* (proteínas das antenas coletoras de luz) e à resistência ao estresse oxidativo (SOD, CAT e APX), como relatado por Zhou et al. (2023).

Pagliarini et al. (2023), avaliando o efeito de inoculação de *B. subtilis* em alface e manjerição, observaram aumento significativo nas concentrações de clorofilas e carotenóides, acompanhado de melhora na qualidade nutricional das plantas. Esse incremento foi atribuído à maior eficiência fotossintética e à redução do estresse oxidativo, indicando que a presença de microrganismos benéficos estimula o metabolismo primário de pigmentos fotossintéticos.

De modo análogo, Oliveira et al. (2023) verificaram que plantas inoculadas com consórcios bacterianos apresentaram maior estabilidade de membranas e aumento da taxa fotossintética líquida, associando esses efeitos ao maior conteúdo de clorofila total.

Outro aspecto que, em ambientes de *vertical farming*, a eficiência do uso da luz está diretamente relacionada à concentração de pigmentos fotossintéticos. A meta-análise de Jin et al. (2023) mostrou que a luz em fazendas verticais é em média três vezes maior que em cultivos convencionais. Assim, a inoculação com *P. aryabhatai* e *B. subtilis* representa uma estratégia

biotecnológica eficiente para otimizar a fisiologia das plantas e melhorar o aproveitamento da luz em sistemas de cultivo controlado, como o *vertical farming*.

A (Tabela 15) mostra que não houve diferenças estatísticas significativas nos teores de clorofila “a”, clorofila “b” e clorofila total entre as intensidades 700 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e 950 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Esses resultados indicam que ambas as condições luminosas foram adequadas para sustentar níveis semelhantes de pigmentos fotossintéticos, sugerindo uma eficiente capacidade de aclimação das plantas de alface (*Lactuca sativa* L.).

Estudos recentes confirmam que a alface apresenta ampla plasticidade fisiológica frente à variação da intensidade luminosa. Liu et al. (2024) observaram que plantas cultivadas sob intensidades entre 60 e 600 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ mantiveram proporções equilibradas de clorofila a e b, sem reduções significativas em níveis moderados de luz.

Da mesma forma, Wang et al. (2025) reportaram que o uso de LEDs brancos suplementados com luz vermelha promoveu leve aumento na clorofila total, mas sem alterar significativamente a razão entre os pigmentos fotossintéticos, evidenciando um mecanismo compensatório de adaptação.

Por outro lado, Carotti et al. (2021) evidenciaram que, quando a intensidade de luz é combinada com variações de temperatura radicular, há efeitos significativos sobre a fotossíntese líquida e a concentração de clorofila. Isso sugere que, isoladamente, a intensidade de luz pode não alterar pigmentos, mas em interação com outros fatores ambientais (temperatura, nutrientes, CO_2), pode desempenhar papel determinante.

Por sua vez, Salehinia et al. (2024) reforçam que a manutenção dos teores de clorofila está relacionada a mecanismos antioxidantes e de fotoproteção, que se tornam mais expressivos sob intensidades intermediárias de luz, típicas de sistemas de vertical farming.

Em ambientes controlados, essa estabilidade é desejável, pois permite reduzir o consumo energético sem comprometer a capacidade fotossintética e o potencial produtivo da cultura (Wang et al., 2025; Somma et al., 2025; Liu et al., 2024).

6 CONCLUSÃO

A integração entre o manejo da intensidade luminosa e a aplicação de microrganismos promotores de crescimento demonstrou elevado potencial para modular processos fisiológicos, morfológicos, nutricionais e metabólicos em *Lactuca sativa* L. cultivada em ambiente indoor.

A inoculação com *B. subtilis* UFV S1 e *P. aryabhattai* CCT 7986, aplicada de forma isolada ou em consórcio, aumentou significativamente a germinação das sementes e influenciou de maneira consistente a dinâmica populacional bacteriana no substrato, com respostas diretamente moduladas pelas intensidades luminosas avaliadas.

As análises metabólicas evidenciaram que os bioinsumos promoveram alterações expressivas no perfil químico das plantas, especialmente *P. aryabhattai* e o consórcio, que resultaram em agrupamentos metabólicos distintos e sensíveis às variações de intensidade luminosa. Esses resultados indicam um efeito sinérgico entre a microbiota benéfica e o ambiente luminoso, modulando vias relacionadas ao metabolismo secundário e à adaptação fisiológica no cultivo protegido.

Do ponto de vista nutricional, observou-se incremento nos teores de P e Zn em determinados tratamentos microbianos, enquanto a maior intensidade luminosa reduziu o acúmulo foliar de P, reforçando que a luz exerce papel determinante na redistribuição e assimilação de nutrientes. As respostas morfométricas e fisiológicas foram consistentes com esse padrão integrado, evidenciando que a combinação entre bioinsumos e manejo luminoso direciona o desempenho vegetativo.

Diante dos resultados, a melhor combinação identificada neste estudo foi a inoculação com *B. subtilis* UFV S1 associada à menor intensidade luminosa ($700 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), a qual favoreceu o crescimento morfofisiológico, aprimorou a eficiência metabólica e contribuiu para maior equilíbrio nutricional. Assim, a integração entre bioinsumos e controle preciso da iluminação consolida-se como uma abordagem eficiente e sustentável, capaz de otimizar o cultivo de alface em sistemas indoor com maior precisão e estabilidade produtiva.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHMAD, M. et al. Zinc-solubilizing *Bacillus* strains enhance nutrient uptake and growth in plants. **Frontiers in Microbiology**, [S. l.], v. 16, p. 1–12, 2025.
- ALMIRÓN, C. et al. Functional and genomic analyses of plant growth-promoting mechanisms in *Priestia aryabhatai*. **Scientific Reports**, [S. l.], 2025. Acesso em: 7 out. 2025.
- ANDREATA, M. F. L. et al. Microbial fertilizers: current scenario of mechanisms and applications. **Plants**, Basel, v. 13, n. 18, 2024. Acesso em: 15 out. 2025.
- ASIF, M. et al. GC-MS analysis of chemical constituents of hydroalcoholic leaf extract of *Cissampelos pareira* and their anti-diabetic activity. **Asian Plant Research Journal**, [S. l.], v. 7, n. 1, p. 36–49, 2021. DOI: 10.9734/APRJ/2021/v7i130148. Disponível em: <https://doi.org/10.9734/APRJ/2021/v7i130148>. Acesso em: 12 nov. 2025.
- BAE, J. H.; KO, B. Effect of photosynthetic photon flux density on paprika seedling growth using rockwool block. **Plants**, Basel, v. 14, n. 9, p. 1378, 2025. DOI: 10.3390/plants14091378. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/plants14091378>. Acesso em: 20 nov. 2025.
- BAIYIN, B. et al. Metabolite profiling of hydroponic lettuce roots affected by nutrient solution flow: insights from comprehensive analysis using widely targeted metabolomics and MALDI mass spectrometry imaging approaches. **International Journal of Molecular Sciences**, Basel, v. 25, n. 18, p. 10155, 2024. DOI: 10.3390/ijms251810155. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijms251810155>. Acesso em: 5 nov. 2025.
- BAKKI, M. et al. Phosphate-solubilizing *Pseudomonas* and *Bacillus*: mechanisms and applications. **Frontiers in Microbiology**, [S. l.], v. 14, p. 1–20, 2024.
- BIANCO, C.; IMPERLINI, E.; RUOCCO, M. Engineering the rhizosphere microbiome with plant growth-promoting bacteria for modulation of the plant metabolome. **Plants**, Basel, v. 13, n. 16, p. 2309, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2223-7747/13/16/2309>. Acesso em: 29 nov. 2025.
- BICUDO, B. S.; TEISCHMANN, G. A. P.; JARDINI, D. C. Adubação fosfatada associada ao uso de microrganismos solubilizadores de fosfatos na cultura da alface. **Agro**, Cuiabá, v. 11, n. 4, 2023. Disponível em:

<https://www.repositoriodigital.univag.com.br/index.php/agro/article/view/1858/1769>. Acesso em: 13 nov. 2025.

CABRERA-PERALTA J.; PEÑA-ÁLVAREZ A. GC–MS metabolomics of French lettuce (*Lactuca sativa* L. var. *capitata*) leaves exposed to bisphenol A via the hydroponic media. **Metabolomics**, [S. l.], v. 20, n. 5, p. 106, 2024. DOI: 10.1007/s11306-024-02168-1. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11306-024-02168-1>. Acesso em: 12 nov. 2025.

CAROTTI, L. et al. Plant factories are heating up: hunting for the best combination of light intensity, air temperature and root-zone temperature in lettuce production. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 11, p. 592171, 2021. DOI: 10.3389/fpls.2020.592171. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.592171>. Acesso em: 10 set. 2025.

CASTRO, A.; SANTOS, R.; MENEZES, D. Light-regulated phenolic metabolism in leafy vegetables under controlled environments. **Journal of Plant Physiology**, [S. l.], v. 320, p. 1–10, 2024.

CHEN, C. et al. Red and blue light regulate auxin distribution and root morphogenesis in lettuce (*Lactuca sativa* L.). **Plant Physiology and Biochemistry**, Paris, v. 201, p. 107966, 2023. DOI: 10.1016/j.plaphy.2023.107966. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.107966>. Acesso em: 21 set. 2025.

CHIARANUNT, P.; WHITE, J. F. Plant beneficial bacteria and their potential applications in vertical farming systems. **Plants**, Basel, v. 12, n. 400, p. 1–27, 2023. DOI: 10.3390/plants12020400. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/plants12020400>. Acesso em: 17 set. 2025.

CHOWDHURY, T.; SAMARAKOON, U. C.; ALTLAND, J. E. Evaluation of hydroponic systems for organic lettuce production in a controlled environment. **HortScience**, Alexandria, v. 59, n. 2, p. 233–239, 2024. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39166254/>. Acesso em: 22 set. 2025.

DE HAAS, B. R. et al. Light and substrate composition control root exudation in soilless culture conditions. **Plants**, [S. l.], v. 13, n. 20, 2024. Acesso em: 26 out. 2025.

DE HAAS, B. R. et al. Root exudation responses to controlled-environment lighting regimes. **bioRxiv**, [S. l.], 2025. Acesso em: 2 nov. 2025.

DENG, C. et al. Molecular mechanisms of plant growth promotion for *Bacillus aryabhattai* (*Priestia*) and its potential as a bioinoculant. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 13, p. 963084, 2022. DOI: 10.3389/fpls.2022.963084. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.963084>. Acesso em: 11 set. 2025.

DOU, H. et al. Effects of red and blue light ratios on lettuce growth and nutrient accumulation under LED illumination. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, v. 318, p. 112024, 2023. DOI: 10.1016/j.scienta.2023.112024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112024>. Acesso em: 15 set. 2025.

ELKINS, C.; VAN IERSEL, M. Longer photoperiods with the same daily light integral increase plant growth. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 11, p. 1–12, 2020. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7570151/>. Acesso em: 19 nov. 2025.

ESCOBAR, J. P. et al. *Bacillus*-induced modulation of phenolic and volatile compounds in leafy vegetables: a metabolomic approach. **Plant Physiology and Biochemistry**, [S. l.], v. 205, p. 112–124, 2024.

FARHANGI, H. et al. Optimizing growth conditions in vertical farming: enhancing lettuce and basil cultivation through the application of the Taguchi method. **Scientific Reports**, [S. l.], v. 13, p. 6717, 2023. DOI: 10.1038/s41598-023-33855-z. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-33855-z>. Acesso em: 18 set. 2025.

GUO, S. et al. Plant-microbe interactions influence plant performance via boosting beneficial root-endophytic bacteria. **Environmental Microbiome**, [S. l.], v. 20, p. 30, 2025. Disponível em: <https://environmentalmicrobiome.biomedcentral.com/articles/10.1186/s40793-025-00680-y>. Acesso em: 29 nov. 2025.

GUPTA, R. S. et al. Robust demarcation of 17 distinct *Bacillus* species clades, proposed as novel Bacillaceae genera, by phylogenomics and comparative genomic analyses. **International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology**, [S. l.], v. 70, p. 5753–5798, 2020. DOI: 10.1099/ijsem.0.004475. Disponível em: <https://doi.org/10.1099/ijsem.0.004475>. Acesso em: 14 set. 2025.

HAN, M. et al. Linking rhizosphere soil microbial activity and plant resource use. **Journal of Ecology**, [S. l.], v. 111, n. 11, 2023. Acesso em: 11 nov. 2025.

HOSSAIN, T. J.; AHMED, M.; RAHMAN, M. Methods for screening and evaluating antimicrobial activity: a review of protocols, advantages and limitations. **Microbial Methods Review**, [S. l.], v. 4, n. 2, p. 1-15, 2024.

MARQUES, M. G. **Qualidade de *Lactuca sativa* L. sob intensidades de LED submetida ao estresse hídrico e atividade micorrízica**. 2024. 67 f. Tese (Doutorado em Ciências Agrárias – Agronomia) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde, Rio Verde, 2024.

JENSEN, C. N. G. et al. *Bacillus subtilis* promotes plant phosphorus (P) acquisition and root development. **Physiologia Plantarum**, [S. l.], v. 172, p. 1–15, 2024.

JIN, W. et al. Light use efficiency of lettuce cultivation in vertical farms compared with greenhouse and field. **Food and Energy Security**, [S. l.], v. 12, n. 1, e391, 2023. DOI: 10.1002/fes3.391. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/fes3.391>. Acesso em: 19 set. 2025.

KASOZI, N. et al. Effect of *Bacillus* spp. on lettuce growth and root system architecture. **Agronomy**, Basel, v. 11, n. 2, p. 280, 2021. DOI: 10.3390/agronomy11020280. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy11020280>. Acesso em: 9 set. 2025.

KE, X. et al. Photosynthetic photon flux density affects fruit biomass radiation-use efficiency of dwarf tomatoes under LED light at the reproductive growth stage. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 14, p. 1076423, 2023. DOI: 10.3389/fpls.2023.1076423. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1076423>. Acesso em: 18 out. 2025.

KELLY, N. et al. Increasing light integral with supplemental lighting benefits lettuce production in a controlled environment. **HortScience**, [S. l.], v. 55, n. 7, p. 1108–1114, 2020.

KHAN, A. R. et al. Plant growth-promoting rhizobacteria (*Bacillus* spp.) enhance fruit yield and quality of tomato under field conditions. **Plants**, Basel, v. 12, n. 3, p. 515, 2023. DOI: 10.3390/plants12030515. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/plants12030515>. Acesso em: 21 set. 2025.

KHOSO, M. A. et al. Impact of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) on plant nutrition and root characteristics: current perspective. **Plant Stress**, Amsterdam, v. 11, p. 100341, 2024. DOI: 10.1016/j.stress.2023.100341. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.stress.2023.100341>. Acesso em: 5 nov. 2025.

KHUSNA, R. Y. et al. Isolation and identification of plant growth-promoting *Priestia aryabhatai*. **Brazilian Journal of Biological Sciences**, [S. l.], v. 11, n. 2, p. 57-65, 2024. Acesso em: 23 nov. 2025.

KUSUMA, P.; HERNÁNDEZ, R.; BUGBEE, B. Photon efficacy of photosynthetic photons: A review of horticultural LED lighting efficacy and photon efficiency in plant growth. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 11, p. 604, 2020. DOI: 10.3389/fpls.2020.00604. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00604>. Acesso em: 7 set. 2025.

LAURINDO, L. K. et al. Effect of nutrient concentration, PGPR and AMF on plant growth, yield and nutrient uptake of hydroponic lettuce. **International Journal of Multidisciplinary Research**, [S. l.], v. 11, p. 44–53, 2024.

LIAN, J. et al. Both light and soil moisture affect the rhizosphere microecology in two oak species. **Frontiers in Microbiology**, Lausanne, v. 16, p. 1506558, 2025. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/microbiology/articles/10.3389/fmicb.2025.1506558>. Acesso em: 29 nov. 2025.

LIU, N. et al. Propagation light intensity influences yield, morphology, and phytochemistry of purple-leaf butterhead lettuce (*Lactuca sativa*). **Journal of Agriculture and Food Research**, Amsterdam, v. 16, p. 100247, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.100247>. Acesso em: 12 set. 2025.

LIU, Q.; KE, X.; GOTO, E. High photosynthetic photon flux density differentially improves edible biomass space use efficacy in Edamame and dwarf tomato. **Plants**, Basel, v. 13, n. 13, p. 1858, 2024. DOI: 10.3390/plants13131858. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/plants13131858>. Acesso em: 29 set. 2025.

MACHADO, F. R. **Inoculação de bactérias promotoras de crescimento na cultura da alface**. 2021. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual do

Oeste do Paraná, Toledo, 2021. Disponível em:

<https://tede.unioeste.br/handle/tede/5734>. Acesso em: 15 nov. 2025.

MAGUIRE, J. D. Speed of germination—Aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigor. **Crop Science**, Madison, v. 2, n. 2, p. 176–177, 1962. DOI: 10.2135/cropsci1962.0011183X000200020033x. Disponível em: <https://doi.org/10.2135/cropsci1962.0011183X000200020033x>. Acesso em: 25 set. 2025.

OLIVEIRA, A. F. et al. Yield, nutrition, and leaf gas exchange of lettuce plants in a hydroponic system in response to *Bacillus subtilis* inoculation. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 14, p. 1248044, 2023. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2023.1248044>. Acesso em: 2 set. 2025.

OLIVEIRA, A. K. et al. Desempenho da alface em diferentes tipos de cultivo protegido: uma análise comparativa. **Pesquisa Agropecuária Moderna**, [S. l.], v. 30, n. 4, p. 210–225, 2019. Acesso em: 2 set. 2025.

OLIVEIRA, C. E. S. et al. Yield, nutrition, and leaf gas exchange of lettuce plants in a hydroponic system inoculated with *Bacillus subtilis*. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 14, p. 1148396, 2023. DOI: 10.3389/fpls.2023.1148396. Disponível em:

<https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1148396>. Acesso em: 11 set. 2025.

PAGLIARINI, E. et al. Yield and nutraceutical value of lettuce and basil inoculated with plant growth-promoting *Bacillus* strains. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 184, p. 104666, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0929139323001123>. Acesso em: 10 set. 2025.

PAGLIARINI, E. et al. Yield and nutraceutical value of lettuce and basil inoculated with plant growth-promoting rhizobacteria under different nitrogen levels. **Agronomy**, Basel, v. 12, n. 5, p. 1180, 2022. DOI: 10.3390/agronomy12051180. Disponível em:

<https://doi.org/10.3390/agronomy12051180>. Acesso em: 9 set. 2025.

PANDURO, R. A. M. **Análise do comportamento da alface (*Lactuca sativa* L.) sob diferentes condições de iluminação**. 2023. 154 f. Tese (Doutorado em Energia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023. Disponível em:

<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11131/tde-20231122-100253/publico/RengifoPanduro-AnaMaria.pdf>. Acesso em: 2 dez. 2025.

PATEL, M. *Bacillus subtilis* ER-08, a multifunctional plant growth-promoting rhizobacterium promotes the growth of fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.) plants under salt and drought stress. **Scientific Reports**, [S. l.], v. 13, p. 20614, 2023.

RODRIGUES, A. F. O. **Composto de resíduo orgânico urbano e inoculação micorrízica no crescimento e nutrição da alface (*Lactuca sativa* L.)**. 2024. 54 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2024. Disponível em: <https://locus.ufv.br/items/8e2fb1ec-4929-46bd-910a-da863a065264>. Acesso em: 18 set. 2025.

SANTI, G. C. et al. Inoculation with biofilm of *Bacillus subtilis* promotes the growth of *Lactuca sativa*. **Sustainability**, Basel, v. 15, n. 2, p. 1189, 2023. DOI: 10.3390/su15021189. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su15021189>. Acesso em: 16 set. 2025.

SANTANA, L. O. et al. Metabolomic responses of lettuce to variations in light intensity using GC-MS and multivariate analysis. **Agricultural Sciences**, [S. l.], v. 15, p. 98–112, 2024.

SHAH, M. et al. GC-MS-based profiling of secondary metabolites in lettuce under abiotic stress. **Food Chemistry**, [S. l.], v. 435, p. 1–13, 2024.

SHAHID, M. et al. Stress-tolerant endophytic isolate *Priestia aryabhatai* promotes plant growth and induces salt stress tolerance in maize. **Microorganisms**, Basel, v. 10, n. 7, p. 1360, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-2607/10/7/1360>. Acesso em: 12 set. 2025.

SOMMA, A. et al. Increasing the red fraction in LED supplemental light enhances yield without affecting the quality of greenhouse-grown lettuce. **HortScience**, Alexandria, v. 60, n. 2, p. 163–170, 2025. DOI: 10.21273/HORTSCI17016-25. Disponível em: <https://doi.org/10.21273/HORTSCI17016-25>. Acesso em: 19 set. 2025.

SOUFI, H. R. et al. Manipulation of light spectrum is an effective tool to regulate biochemical traits and gene expression in lettuce under different replacement methods of nutrient solution. **Scientific Reports**, [S. l.], v. 13, p. 8600, 2023.

DOI: 10.1038/s41598-023-35326-x. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-35326-x>. Acesso em: 15 nov. 2025.

TANG, W. et al. Effect of light intensity on plant morphology, photosynthesis and growth of lettuce (*Lactuca sativa* L.) under LED lighting. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 13, p. 875–884, 2022. DOI: 10.3389/fpls.2022.875884. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.875884>. Acesso em: 20 set. 2025.

TSOTETSI, T. *Bacillus* for plant growth promotion and stress resilience. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 13, 2022.

TSOTETSI, T. et al. *Bacillus* for plant growth promotion and stress resilience: mechanisms and prospects. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, Lausanne, v. 6, p. 886602, 2022. DOI: 10.3389/fsufs.2022.886602. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.886602>. Acesso em: 18 set. 2025.

UPADHYAY, S. K. et al. Root exudates: mechanistic insight of plant growth-promoting rhizobacteria recruitment and function. **Frontiers in Plant Science**, [S. l.], v. 13, 2022. Acesso em: 12 dez. 2025.

VILLANÓ, F.; PROULX, R.; BRILLI, F. Harnessing microbes as sun-cream against high-light stress. **New Phytologist**, [S. l.], v. 267, n. 4, 2025. Disponível em: <https://nph.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/nph.19888>. Acesso em: 29 nov. 2025.

VIRŠILÉ, A. et al. Effect of elevated CO₂ concentration and light intensity on lettuce grown in a climate chamber. **Horticulturae**, [S. l.], v. 5, n. 1, p. 1-13, 2019.

WANG, F. et al. *Priestia aryabhattai* improves soil environment and plant performance by regulating rhizosphere microorganisms and nutrient cycling. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 196, p. 105258, 2024. DOI: 10.1016/j.apsoil.2024.105258. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105258>. Acesso em: 22 set. 2025.

WANG, F. et al. Effects of *Priestia aryabhattai* on phosphorus fraction and implications for ecoremediating Cd-contaminated farmland with plant–microbe technology. **Plants**, Basel, v. 13, n. 2, p. 268, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/plants13020268>. Acesso em: 30 out. 2025.

WANG, J. et al. Effect of LED lights on morphological construction and leaf photosynthesis of lettuce (*Lactuca sativa* L.). **Horticulturae**, Basel, v. 11, n. 1,

p. 43, 2025. DOI: 10.3390/horticulturae11010043. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/horticulturae11010043>. Acesso em: 20 set. 2025.

WICHARUCK, S. et al. Vertical farming for lettuce production in limited space: a case study in Northern Thailand. **PeerJ**, [S. l.], v. 12, e17085, 2024. DOI: 10.7717/peerj.17085. Disponível em: <https://doi.org/10.7717/peerj.17085>. Acesso em: 22 set. 2025.

WICHARUCK, S. et al. Vertical farming: a potential farming practice for lettuce production. **Chilean Journal of Agricultural Research**, Chillán, v. 83, n. 3, p. 248–259, 2023. DOI: 10.4067/S0718-58392023000300248. Disponível em: <https://doi.org/10.4067/S0718-58392023000300248>. Acesso em: 23 set. 2025.

YANG, S. et al. Effects of *Priestia aryabhattai* on phosphorus fraction and implications for ecoremediating Cd-contaminated farmland with plant–microbe technology. **Plants**, Basel, v. 13, p. 268, 2024. DOI: 10.3390/plants13020268. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/plants13020268>. Acesso em: 5 nov. 2025.

YUAN, T. et al. Synergistic effect of grassland plants and beneficial rhizosphere bacteria helps plants cope with overgrazing stress. **BMC Plant Biology**, [S. l.], v. 25, p. 302, 2025. Disponível em: <https://bmcplantbiol.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12870-025-06638-z>. Acesso em: 29 nov. 2025.

ZHOU, C. et al. *Bacillus aryabhattai* regulates photosynthetic gene expression and enhances chlorophyll synthesis under abiotic stress in cucumber plants. **Environmental and Experimental Botany**, Oxford, v. 214, p. 105493, 2023. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2023.105493. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2023.105493>. Acesso em: 21 set. 2025.