

**INSTITUTO FEDERAL GOIANO DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO
CENTRO DE EXCELÊNCIA EM BIOINSUMOS COORDENAÇÃO DE
CAPACITAÇÃO EM BIOINSUMOS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *lato sensu* EM BIOINSUMOS IF GOIANO
CAMPUS MORRINHOS**

JULIO CESAR DELVAUX

**MICROORGANISMOS ENDOFÍTICOS: ECOLOGIA, BENEFÍCIOS E POTENCIAL
COMO BIOINSUMOS NA AGRICULTURA**

MORRINHOS, GO

2025

JULIO CESAR DELVAUX

**MICRORGANISMOS ENDOFÍTICOS: ECOLOGIA, BENEFÍCIOS E POTENCIAL
COMO BIOINSUMOS NA AGRICULTURA**

Monografia apresentada à Banca Examinadora
do Curso de Especialização em Bioinsumos
Instituto Federal Goiano como exigência
parcial para obtenção do título de Especialista.

Orientador: Prof. Dr. José Feliciano Bernardes
Neto

MORRINHOS, 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**

D367m Delvaux, Julio Cesar
Microrganismos Endofíticos: Ecologia, benefícios e potencial
como bioinsumos na agricultura / Julio Cesar Delvaux.
Morrinhos 2025.
66f. il.
Orientador: Prof. Dr. José Feliciano Bernardes Neto.
Monografia (Especialista) - Instituto Federal Goiano, curso de
0430426 - Especialização em Bioinsumos - Morrinhos (Campus
Morrinhos).
1. Agricultura sustentável. 2. Bioinsumo. 3. Bioprospecção. I.
Título.

Regulamento de Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) – CEBIO/IF Goiano

ANEXO V - ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CURSO

Aos **treze** dias do mês de **setembro** de **dois mil e vinte e cinco**, às **16 horas**, reuniu-se a Banca Examinadora composta por: **Prof. Dr. José Feliciano Bernardes Neto** (orientador), **Dr. Bruno Eduardo Cardozo de Miranda** e o **Me. Filipe Gomes da Silva**, para examinar o Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) intitulado “**MICROORGANISMOS ENDOFÍTICOS: ECOLOGIA, BENEFÍCIOS E POTENCIAL COMO BIOINSUMOS NA AGRICULTURA**” de **Julio Cesar Delvaux**, estudante da *lato sensu* em Bioinsumos do **Centro de Excelência em Bioinsumos (CEBIO) do IF Goiano – Campus Morrinhos**, sob a **Matrícula nº 2024104304260009**. A palavra foi concedida ao(à) estudante para a apresentação oral do TC, em seguida houve arguição dos candidatos pelos membros da Banca Examinadora. Após tal etapa, a Banca Examinadora decidiu pela **APROVAÇÃO** do(a) estudante. Ao final da sessão pública de defesa foi lavrada a presente ata, que, após apresentação da versão corrigida do TC, foi assinada pelos membros da Banca Examinadora.

Morrinhos, 13 de setembro de 2025.

(Assinado eletronicamente)

Dr. José Feliciano Bernardes Neto

Orientador

Documento assinado digitalmente
 **BRUNO EDUARDO CARDOZO DE MIRANDA**
Data: 13/09/2025 19:01:36-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Dr. Bruno Eduardo Cardozo de Miranda

Membro da Banca Examinadora

Documento assinado digitalmente
 **FILIPE GOMES DA SILVA**
Data: 13/09/2025 18:55:50-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Me. Filipe Gomes da Silva

Membro da Banca Examinadora

Observação:

Para o caso de REAPRESENTAÇÃO, tem-se no trecho final da Ata a seguinte redação:

“Após tal etapa, a Banca Examinadora decidiu pela **REAPRESENTAÇÃO** do TCC. Desta forma, o estudante deve realizar correções e adequações no trabalho e apresentá-lo novamente em até XX dias, contados a partir de hoje (XX/XX/XXX). Nesta nova oportunidade, após avaliação da banca examinadora, o estudante poderá ser

APROVADO ou REPROVADO, não havendo possibilidade de outra reapresentação. Ao final da sessão pública de defesa foi lavrada a presente ata que foi assinada pelos membros da Banca Examinadora e Responsável de TCC.”

Para o caso de REPROVAÇÃO, tem-se no trecho final da Ata a seguinte redação:

“Após tal etapa, a Banca Examinadora decidiu pela **REPROVAÇÃO** do(a) estudante. Desta forma, o estudante deverá realizar o desenvolvimento e defesa de novo TCC no próximo semestre. Ao final da sessão pública de defesa foi lavrada a presente ata que foi assinada pelos membros da Banca Examinadora e Responsável de TCC.”

Documento assinado eletronicamente por:

■ **Jose Feliciano Bernardes Neto**, **ASSISTENTE DE ALUNO**, em 13/09/2025 18:48:54.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 13/09/2025. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 744089

Código de Autenticação: 5ea2eb9b8f



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

Tese (doutorado)

Dissertação (mestrado)

Monografia (especialização)

TCC (graduação)

Artigo científico

Capítulo de livro

Livro

Trabalho apresentado em evento

Produto técnico e educacional - Tipo:

Nome completo do autor:

Matrícula:

Título do trabalho:

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 inclusos 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.

Documento assinado digitalmente
 **JULIO CESAR DELVAUX**
Data: 02/10/2025 15:11:30-0300
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)

Documento assinado digitalmente



JOSE FELICIANO BERNARDES NETO
Data: 02/10/2025 15:16:39-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

A Deus.

Aos meus pais, à minha esposa e ao meu filho.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por guiar meus passos, pela vida e pela oportunidade de crescimento diante dos obstáculos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. José Feliciano Bernardes Neto pela confiança, pelos ensinamentos, pela paciência e por sempre apoiar e acreditar nesse trabalho.

À minha esposa, Fernanda Júnia Silva Delvaux, pelo incentivo e compreensão durante essa etapa de estudos.

Ao Programa de Pós-Graduação em Bioinsumos do Instituto Federal Goiano, ao Centro de Excelência em Bioinsumos (CEBIO), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG) e à Fundação de Apoio à Pesquisa da Universidade Federal de Goiás (FUNAPE) pelo acolhimento e pelas oportunidades.

A todos, que de alguma forma, apoiaram a condução deste trabalho.



A Deus.

Aos meus pais, à minha esposa e ao meu filho.

Dedico.

BIOGRAFIA DO ALUNO

Julio Cesar Delvaux, filho de Agostinho Delvaux da Silva e Mariza da Silva Ferreira Delveaux, nasceu em Vitória – ES no dia 07 de janeiro de 1984. Graduou-se em Agronomia pela Universidade Federal de Viçosa (UFV) em 2011, e no ano seguinte obteve o título de Mestre em Microbiologia Agrícola pela mesma instituição. Em 2019, concluiu o Doutorado em Agronomia, pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU) e, em 2021, finalizou o Curso de Licenciatura em Formação Pedagógica para a Educação Profissional e Tecnológica pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Triângulo Mineiro (IFTM).

Atualmente, é professor do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Triângulo Mineiro - Campus Ituiutaba atuando no ensino, pesquisa e extensão na área de Microbiologia, com ênfase em Ecologia Microbiana e Microbiologia do Solo.

RESUMO

DELVAUX, JULIO CESAR. Instituto Federal Goiano – Campus Morrinhos – GO, setembro de 2025. **Microrganismos endofíticos: ecologia, benefícios e potencial como bioinsumos na agricultura.** Orientador: José Feliciano Bernardes Neto.

Os endofíticos são microrganismos capazes de colonizar tecidos vegetais de forma assintomática, promovendo diversos benefícios às plantas hospedeiras, como a promoção do crescimento, a supressão de fitopatógenos, proteção contra pragas e herbívoros, o aumento da resistência ao estresse e indução de resistência. Diversos táxons microbianos são capazes de estabelecer a colonização endofítica, com destaque para os fungos, frequentemente associados à proteção contra patógenos e estimulação direta do crescimento pela produção de compostos voláteis, e bactérias, que atuam na promoção do crescimento vegetal por mecanismos diretos e indiretos. As múltiplas vantagens proporcionadas por essas interações, aliadas à possibilidade de redução do uso de fertilizantes inorgânicos e defensivos agrícolas sem a redução da produtividade, posicionam os endofíticos como valiosos recursos biotecnológicos para construção de sistemas agrícolas sustentáveis. Apesar do crescente interesse científico, a aplicação destes microrganismos como bioinsumos ainda é incipiente e demanda maior compreensão. Essa revisão reúne o conhecimento atual sobre fungos e bactérias endofíticas, abordando sua ecologia, os benefícios agrícolas da colonização e o potencial da aplicação destes microrganismos na agricultura sustentável.

Palavras-chave: Agricultura sustentável. Bioinsumo. Bioprospecção.

ABSTRACT

DELVAUX, JULIO CESAR. Instituto Federal Goiano – Campus Morrinhos – GO, september 2025. **Endophytic Microorganisms: Ecology, Benefits, and Potential as Bioinputs in Agriculture.** Advisor: José Feliciano Bernardes Neto.

Endophytic microorganisms are capable of colonizing plant tissues asymptotically, promoting several benefits to their host plants, such as growth promotion, suppression of phytopathogens, protection against pests and herbivores, increased tolerance to abiotic stresses, and induction of systemic resistance. Various microbial taxa can establish endophytic colonization, with emphasis on fungi—often associated with pathogen suppression and direct growth stimulation through the production of volatile compounds—and bacteria, which promote plant growth through direct and indirect mechanisms. The multiple advantages resulting from these interactions, combined with the potential to reduce the use of inorganic fertilizers and chemical pesticides without compromising productivity, position endophytic microorganisms as valuable biotechnological resources for the development of sustainable agricultural systems. Despite growing scientific interest, the application of these microorganisms as bioinputs is still incipient and requires further understanding. This review compiles current knowledge on endophytic fungi and bacteria, addressing their ecology, the agronomic benefits of colonization, and the potential application of these microorganisms in sustainable agriculture.

Keywords: Sustainable agriculture. Bioinput. Bioprospecting

SUMÁRIO

RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
1. INTRODUÇÃO GERAL	1
2. OBJETIVOS	1
REFERÊNCIAS	2
CAPÍTULO I	3
1. Introdução	4
2. Microrganismos endofíticos	7
2.1. <i>Natureza da interação endofítica</i>	7
2.2. <i>O processo de colonização</i>	10
2.3. <i>Benefícios da colonização endofítica</i>	14
2.3.1. <i>Fitoestimulação por meio da modulação dos níveis de fitohormônios</i>	14
2.3.2. <i>Biofertilização</i>	16
2.3.3. <i>Supressão de patógenos e proteção contra pragas e herbívoros</i>	19
2.4. <i>Papel da colonização endofítica na atenuação do estresse abiótico em um cenários de mudanças climáticas</i>	23
3. Potencial agrônomo e desenvolvimento de bioinsumos a partir de microrganismos endofíticos	34
3.1. <i>Biofertilizantes</i>	35
3.2. <i>Bioinoculantes</i>	37
3.3. <i>Bioestimulantes</i>	37
3.4. <i>Metabólitos secundários</i>	39
4. Perspectivas e desafios	40
5. Conclusões	41
6. Referências	42
CONCLUSÃO GERAL	66

1. INTRODUÇÃO GERAL

Os microrganismos interagem com os vegetais de diferentes formas, estabelecendo desde relações negativas, como o parasitismo, até relações benéficas como o comensalismo e mutualismo (MAMETJA et al., 2025). Entre esses microrganismos, destacam-se os endofíticos, capazes de colonizar os tecidos vegetais de forma assintomática e promover benefícios para as plantas, incluindo o aumento do crescimento e da resistência a estresses bióticos e abióticos (AMEEN et al., 2024). Estes consórcios planta-microrganismos exibem grande diversidade taxonômica com amplo espectro de comunidades fúngicas e bacterianas distribuídos nos tecidos vegetais, o que torna os endofíticos um recurso estratégico para a biotecnologia agrícola e a promoção de sistemas agrícolas mais sustentáveis (CHAKRABORTY et al., 2025).

Ademais, os endofíticos apresentam potencial para mitigação dos impactos das mudanças climáticas, que ameaçam os ecossistemas e a segurança da produção global de alimentos (SENA et al., 2024). A colonização endofítica pode atenuar efeitos de diversos estresses abióticos, como deficiência nutricional, seca, alagamento, variações térmicas, salinidade e presença de metais pesados, bem como reduzir os danos decorrentes de estresses bióticos associados ao ataque de pragas e herbívoros (ANAND et al., 2023).

O estudo das comunidades endofíticas tem despertado crescente interesse científico devido ao potencial da utilização destes microrganismos no desenvolvimento de bioinsumos para agricultura. Contudo, apesar dos avanços no isolamento e compreensão do papel das comunidades endofíticas nas plantas, a aplicação prática destes conhecimentos ainda é incipiente e requer maiores esforços de pesquisa e inovação para que possam ser amplamente utilizados na agricultura sustentável (WATTS et al., 2023; ALI et al., 2024).

2. OBJETIVOS

O presente trabalho de revisão tem como objetivo analisar os mecanismos de recrutamento e colonização de microrganismos endofíticos pelas plantas, destacando seu papel na promoção de crescimento vegetal, na mitigação de estresses bióticos e abióticos, bem como

o potencial desses microrganismos no desenvolvimento de bioinsumos para a agricultura sustentável.

REFERÊNCIAS

ALI, M. A.; AHMED, T.; IBRAHIM, E.; RIZWAN, M.; CHONG, K. P.; YONG, J. W. H. A review on mechanisms and prospects of endophytic bacteria in biocontrol of plant pathogenic fungi and their plant growth-promoting activities. **Heliyon**, v. 10, n. 11, 2024. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31573>

AMEEN, M.; MAHMOOD, A.; SAHKOOR, A.; ZIA, M. A.; ULLAH, M. S. The role of endophytes to combat abiotic stress in plants. **Plant Stress**, p. 100435, 2024. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.stress.2024.100435>

ANAND, U.; PAL, T.; YADAV, N.; SINGH, V. K.; TRIPATHI, V.; CHOUDHARY, K. K.; SINGH, A. K. Current scenario and future prospects of endophytic microbes: promising candidates for abiotic and biotic stress management for agricultural and environmental sustainability. **Microbial ecology**, v. 86, n. 3, p. 1455-1486, 2023. DOI: <http://doi.org/10.1007/s00248-023-02190-1>

CHAKRABORTY, A.; AMRIT, R.; DUTTA, P.; OSBORNE, W. J. Unlocking Nature's Vault: Endophytes as Plant-Sourced Biological Treasures. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, p. 103685, 2025. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.bcab.2025.103685>

MAMETJA, N. M.; RAMADWA, T. E.; MANAGA, M.; MASEBE, T. M. Recent Advances and Developments in Bacterial Endophyte Identification and Application: A 20-Year Landscape Review. **Plants**, v. 14, n. 16, p. 2506, 2025. DOI: <http://doi.org/10.3390/plants14162506>

SENA, L.; MICA, E.; VALÈ, G.; VACCINO, P.; PECCHIONI, N. Exploring the potential of endophyte-plant interactions for improving crop sustainable yields in a changing climate. **Frontiers in Plant Science**, v. 15, p. 1349401, 2024. DOI: <http://doi.org/10.3389/fpls.2024.1349401>

CAPÍTULO I

Microrganismos endofíticos: ecologia, benefícios e potencial como bioinsumos na agricultura

(Normas de acordo com a Revista Pesquisa Agropecuária Tropical – Qualis B1)

Resumo

Os endofíticos são microrganismos capazes de colonizar tecidos vegetais de forma assintomática, promovendo diversos benefícios às plantas hospedeiras, como a promoção do crescimento, a supressão de fitopatógenos, proteção contra pragas e herbívoros, o aumento da resistência ao estresse e indução de resistência. Diversos táxons microbianos são capazes de estabelecer a colonização endofítica, com destaque para os fungos, frequentemente associados à proteção contra patógenos e estimulação direta do crescimento pela produção de compostos voláteis, e bactérias, que atuam na promoção do crescimento vegetal por mecanismos diretos e indiretos. As múltiplas vantagens proporcionadas por essas interações, aliadas à possibilidade de redução do uso de fertilizantes inorgânicos e defensivos agrícolas sem a redução da produtividade, posicionam os endofíticos como valiosos recursos biotecnológicos para construção de sistemas agrícolas sustentáveis. Apesar do crescente interesse científico, a aplicação destes microrganismos como bioinsumos ainda é incipiente e demanda maior compreensão. Essa revisão reúne o conhecimento atual sobre fungos e bactérias endofíticas, abordando sua ecologia, os benefícios agrícolas da colonização e o potencial da aplicação destes microrganismos na agricultura sustentável.

Palavras-chave: Agricultura sustentável. Bioinsumo. Bioprospecção.

1. Introdução

A agricultura contemporânea tem sido impulsionada por significativos avanços tecnológicos, os quais têm permitido aumentos expressivos na produtividade agrícola. No entanto, esse progresso tem sido acompanhado por impactos ambientais negativos, tais como a intensificação da emissão de gases do efeito estufa (GEEs), a poluição dos recursos hídricos e do solo, bem como a redução da biodiversidade, revelando a necessidade de se buscar por novos insumos capazes de substituir os convencionais (Brunelle et al., 2024). Esse cenário torna-se mais preocupante diante das projeções de aumento da população mundial e a necessidade de aumento da produção agrícola (Yang et al., 2024), que encontra desafios frente às mudanças climáticas e a necessidade de meios produtivos mais eficazes em menores áreas.

Em um momento em que em todo o mundo ocorrem fenômenos que são marcas dos primeiros grandes impactos das mudanças climáticas sobre a produção agrícola do planeta, a ciência tem recorrido em a ambientes naturais, onde as ações humanas são poucas intensificadas, na busca de meios que potencializam ou gerem novas estratégias para o desenvolvimento de novas tecnologias economicamente e ecologicamente sustentáveis para manutenção da produção mundial de alimentos (Muhammad et al., 2024), destacando-se a pesquisa e a produção de bioinsumos agrícolas (Duque et al., 2024).

Os bioinsumos são um novo conceito ou terminologia que é bem amplo, mas que em suma são produtos, processos ou tecnologias de origem vegetal, animal ou microbiana destinados ao uso na produção, armazenamento e no beneficiamento de produtos agropecuários, sistemas de produção aquáticos ou de florestas plantadas (Brasil, 2024).

Os bioinsumos apresentam-se como alternativa disruptiva para aumentar a produtividade agrícola, seja por meio do aumento da disponibilidade de nutrientes, promoção da fixação biológica de nitrogênio, aumento do crescimento de raízes, proteção contra pragas e

patógenos e ou pela mitigação da produção de gases do efeito estufa (GEEs) (Mohite et al., 2019; Gama et al., 2025). Entre as diferentes tecnologias de bioinsumos disponíveis, destacam-se aquelas direcionadas à produção de biofertilizantes, inoculantes e agentes de biocontrole, capazes de reduzir os custos de aplicação ao mesmo tempo que propiciam o aumento da sustentabilidade das lavouras (Rocha et al., 2024).

Microrganismos naturalmente desempenham papéis essenciais na agricultura atuando como promotores de crescimento de plantas (Xu et al., 2025), bioestimulantes e promotores de resiliência ao estresse abiótico (Nunes et al., 2024). A forma com que as plantas conseguem aproveitar os benefícios proporcionados pelos microrganismos benéficos ao mesmo tempo em que é capaz de impedir a ação de microrganismos patogênicos tem despertado crescente interesse da comunidade científica (Cheng et al., 2019). Entre os grupos microbianos de maior interesse agrícola, os microrganismos endofíticos têm recebido atenção especial principalmente em razão da compreensão de um amplo número de benefícios que estes microrganismos podem propiciar às plantas hospedeiras (Tiwari et al., 2023).

Utilizado pela primeira vez por Bary (1866), o termo endofítico é utilizado para descrever qualquer microrganismo que habita tecidos vegetais em pelo menos uma parte do seu ciclo de vida sem mostrar quaisquer sinais externos de infecção (Pathak et al., 2022; Ameen et al., 2024). O avanço na compreensão dos papéis desempenhados por esses microrganismos na promoção do crescimento de plantas e atenuação do estresse ambiental junto ao grande número de espécies isoladas e descritas, faz do estudo dos endofíticos uma estratégia promissora para o desenvolvimento de novos bioinsumos, principalmente no que tange à etapa de prospecção.

O desenvolvimento de novos bioinsumos inclui, via de regra, a pesquisa e a identificação do ativo biológico, o desenvolvimento da formulação de utilização deste ativo, a realização de testes de eficiência e eficácia em ambiente controlado e em campo de produção,

a avaliação de segurança do produto e o registro nos órgãos reguladores do país de utilização (Bullor et al., 2024).

A prospecção de microrganismos endofíticos e a comprovação de sua eficiência na promoção de crescimento e na mitigação do estresse ambiental em ambiente controlado tem se mostrado eficiente, no entanto, ainda são escassas as informações sobre o real potencial de utilização dos endofíticos no desenvolvimento de novos bioinsumos para agricultura (Adeleke et al., 2022). Compreender o papel dos microrganismos endofíticos nos processos de aquisição de nutrientes pelas plantas, na promoção de crescimento e, também, como agentes de biocontrole de pragas e doenças é essencial para o desenvolvimento de novas tecnologias sustentáveis na agricultura (Watts et al., 2023).

Este estudo consiste em uma revisão bibliográfica sistematizada com o objetivo de elucidar e abordar as comunidades endofíticas, os principais mecanismos de colonização utilizados por esses microrganismos, as estratégias de recrutamento pelas plantas, bem como o papel da microbiota endofítica na promoção do crescimento vegetal e na supressão de estresses bióticos e abióticos. Além disso, a revisão contempla os principais benefícios e desafios relacionados ao uso desses microrganismos na formulação de bioinsumos para a agricultura (Figura 1).

Para tanto, foram selecionados e analisados artigos originais e revisões científicas de relevância, com ênfase em publicações da última década. As buscas bibliográficas foram conduzidas nas bases de dados *Web of Science* e *Google Acadêmico*, utilizando os termos “*endophyte*” combinados com “*diversity*”, “*fungus*”, “*bacteria*”, “*agricultural*” e “*bioinputs*”. Os critérios de seleção priorizaram estudos que abordaram a diversidade, ecologia e aplicações agrícolas de microrganismos endofíticos.

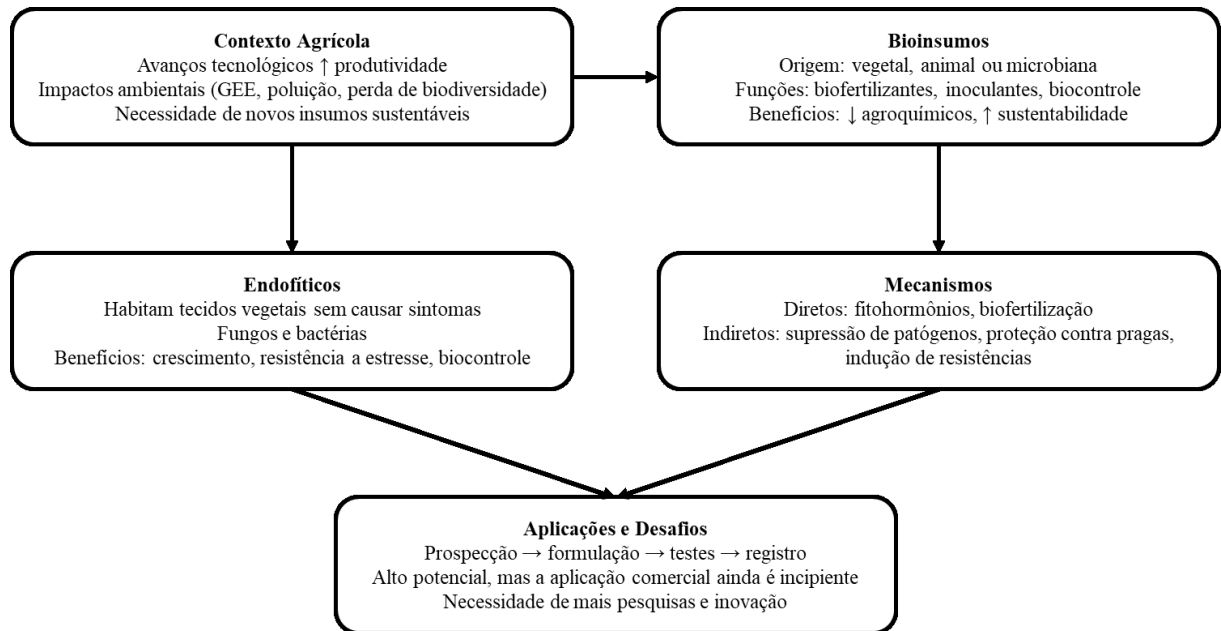


Figura 1. Potencial de utilização de microrganismos endofíticos como bioinsumos para agricultura sustentável.

2. Microrganismos endofíticos

2.1. Natureza da interação endofítica

Microrganismos endofíticos são caracterizados como organismos, principalmente bactérias e fungos, capazes de habitar vegetais sem causar doenças ou, pelo menos, sem apresentarem sintomas aparentes (Sena et al., 2024). Há registros da colonização endofítica em diversas partes da planta, incluindo raízes, caules, folhas, flores e frutos (Kuźniar et al., 2025), estando a presença destes microrganismos normalmente associada à melhorias adaptativas das plantas (White et al., 2019) tais como, facilitação da aquisição de nutrientes, defesa contra o ataque de pragas e doenças, modulação do crescimento e desenvolvimento (Wani et al., 2015) e supressão do crescimento de plantas daninhas (Suryanarayanan, 2019). Pressupõe-se que

todas as espécies de plantas sejam hospedeiras de pelo menos uma espécie endofíticas no decorrer de sua vida (Rabbee et al., 2024).

Dada a natureza da interação harmônica entre planta e microrganismo, o endofitismo é classificado como interação mutualística, com benefícios para ambos os partícipes da relação (Wani et al., 2015). Do ponto de vista ecológico, espécies invasoras necessitam estabelecer relações suficientes harmônicas com o hospedeiro para que o processo de colonização tenha sucesso, devendo esta boa relação estender-se, também, com os indivíduos da biota nativa do ecossistema (Aizen & Torres, 2024).

Quanto à evolução da relação mutualística no tempo, as interações endofítico-hospedeiro podem ser sistêmicas ou verdadeiras (endofíticos verdadeiros), termo utilizado para descrever relações onde os endofíticos coevoluiram com seu hospedeiro sendo normalmente transmitidos de forma vertical, ou transitórias (endofíticos transitórios), quando a relação microrganismo-hospedeiro pode alternar-se entre mutualismo e parasitismo dependendo das condições ambientais (Sena et al., 2024). Destaca-se ainda que a relação microrganismo-hospedeiro possa ser comensal, havendo fornecimento de alimento ao endofítico sem contrapartida ou prejuízo para a planta hospedeira, sendo um estado intermediário entre o mutualismo e o parasitismo (Mishra et al., 2021). Via de regra, endofíticos verdadeiros que coevoluíram intimamente com seus hospedeiros não causam danos às plantas ao longo das gerações, enquanto os endofíticos não sistêmicos podem, em algum momento, causar prejuízos ao vegetal (Orozco-Mosqueda & Santoyo, 2021). O fungo patogênico *Colletotrichum magna*, causador da antracnose em cucurbitáceas pode crescer assintomaticamente em várias espécies de cucurbitáceas, havendo isolados de *C. magna* capazes de trazer benefícios a essas plantas (Kogel et al., 2006).

O endofitismo é relatado em vários táxons microbianos tais como fungos, bactérias e archaeas, sendo mais comumente estudados os fungos e as bactérias endofíticas em razão da predominância destes nas colonizações endofíticas conhecidas (Burraroni & Jeon, 2021).

Os fungos figuram como os microrganismos endofíticos mais relatados em plantas, estando sua presença normalmente associada à proteção da planta contra patógenos e estimulação direta do crescimento da planta por meio da produção de compostos voláteis (Orozco-Mosqueda & Santoyo, 2021). A maior parte dos fungos endofíticos relatados estão concentrados nos filos Ascomycota, Basidiomycota, Mucoromycota e Oomycota (Li et al., 2025). As bactérias endofíticas também apresentam uma ampla diversidade, estando representadas, principalmente, nos filos Proteobacteria, Actinobacteria, Firmicutes e Bacteroidetes (Kandel et al., 2017). Às bactérias endofíticas é atribuído, principalmente, o papel de promoção do crescimento vegetal por mecanismos diretos e indiretos (Orozco-Mosqueda & Santoyo, 2021).

O endofitismo pode ainda ser classificado quanto à estratégia durante o ciclo de vida do microrganismo, podendo ser obrigatório, facultativo ou passivo (Anand et al., 2023). Endofíticos obrigatórios são adaptados à vida no interior dos tecidos vegetais sendo, normalmente, transmitidos verticalmente entre as gerações da planta por meio das sementes. Os endofíticos facultativos habitam amplamente o solo e colonizam os tecidos vegetais quando encontram condições adequadas. Os endofíticos passivos são oportunistas que adotam o endofitismo quando têm a oportunidade de adentrar os tecidos vegetais por meio de ferimentos ou aberturas naturais (Hardoim et al., 2015; Santos et al., 2018).

A biodiversidade dos endofíticos tem fascinado cientistas das mais diversas áreas da ciência, sendo várias as aplicações biotecnológicas almejadas para estes microrganismos, principalmente na agricultura (Dissanayake et al., 2018), contudo, o estudo dos endofíticos encontra limitações de isolamento e identificação destes microrganismos, sendo estes trabalhos

baseados em métodos dependentes de cultivo, onde são isolados e caracterizados microrganismos endofíticos cultiváveis e métodos independentes de cultivo, baseadas na extração e estudo do genoma de comunidades inteiras de microrganismos associados à plantas. Enquanto o isolamento por métodos dependentes de cultivo permite um amplo estudo da morfologia e fisiologia do microrganismo, os métodos moleculares ou independentes de cultivo proporcionam o conhecimento da diversidade genética, da diversidade funcional e revelam informações importantes sobre o processo de coevolução planta-endofítico (Sun & Guo, 2012; Reis et al., 2022).

2.2. O processo de colonização

Ainda que os as interações endofíticas tenham objetivos semelhantes, os mecanismos de colonização utilizados por fungos e bactérias podem distinguir-se consideravelmente (Hardoim et al., 2015).

O sucesso do processo de colonização de fungos e bactérias endofíticas depende do estabelecimento de interações compatíveis entre microrganismo e a planta, sendo essas interações determinadas por diferentes fatores tais como, táxon microbiano, genótipo da planta, o tipo de tecido colonizado e as condições ambientais (Mengistu, 2021). O processo de colonização de plantas por fungos e bactérias endofíticas pode ser dividido em três etapas: a (I) atração, onde o microrganismo é naturalmente transmitido de entre as gerações por meio de sementes ou tecidos (na propagação vegetativa) ou são recrutados no ambiente por meio de complexas interações planta-microrganismo que envolvem na maioria das situações a produção e o reconhecimento de nutrientes ou biomoléculas exsudados pela planta; o (II) reconhecimento, etapa em que planta distingue os microrganismos benéficos de possíveis patógenos. O reconhecimento normalmente é viabilizado por meio de receptores de

reconhecimento padrão (PRRs - Pattern Recognition Receptors) presentes nas plantas; e a (III) colonização, etapa final do estabelecimento da relação onde o microrganismo venceu as barreiras físicas e químicas de defesa da planta, se estabelecendo como mutualista (Ji et al., 2022; Sena et al., 2024)

Os fungos endofíticos podem penetrar as plantas por diferentes rotas tais como, estômatos, lenticelas e feridas nas raízes ou partes aéreas (Lu et al., 2021), estando organizados, em função do processo de colonização, em quatro classes (Rodriguez et al., 2009). A classe 1, ou *Clavicipitaceous*, inclui os fungos endofíticos que colonizam os tecidos vegetais abaixo e acima do solo, colonizando especificamente as gramíneas e apresentando transmissão vertical e horizontal. A transmissão dos fungos da classe 1 ocorre prioritariamente de forma vertical, sendo transmitido principalmente por meio de sementes. As classes 2, 3 e 4, chamadas não-clavicipitaceous, não possuem grupo de hospedeiro específico, sendo os englobados na classe 2 os fungos que também possuem mecanismos de transferência horizontal ou vertical, sendo a maioria dos representantes desta classe pertencentes ao filo *Ascomycota*. Na classe 3 encontram-se os fungos pertencentes, principalmente, aos fillos *Ascomycota* e *Basidiomycota* que apresentam transmissão exclusivamente horizontal em tecidos localizados prioritariamente acima do solo. A classe 4 compreende os fungos endofíticos escuros e septados que, semelhante aos fungos micorrízicos, estão restritos à colonização dos espaços inter e intra radiculares (Rodriguez et al., 2009; Majhi et al., 2025).

Quanto à forma de transmissão dos fungos endofíticos podem apresentar dois padrões: a transmissão vertical, onde o microrganismo é veiculado via sementes que, quando encontram condições ambientais favoráveis, germinam e colonizam a nova plântula e pela transmissão horizontal, onde o fungo endofítico presente nos tecidos da parte aérea é transmitido por meio de esporos e partes de hifas que podem ser disseminadas pelo vento, água ou animais para diversas plantas hospedeiras (Yan et al., 2019; Bard et al., 2024).

Os fungos endofíticos podem ser classificados também em função do modo de reprodução em sexuados e assexuados, de acordo com a fonte de nutrição em biotróficos e necrotróficos ou em função da expressão da infecção, onde são classificados em sintomáticos e assintomáticos (Adeleke et al., 2022).

A colonização por bactérias endofíticas ocorre, principalmente nas raízes em razão da grande concentração de exsudatos radiculares no ambiente rizosférico, responsável pela sinalização e atração destes microrganismos (Adeleke et al., 2022). A colonização por bactérias endofíticas também pode ocorrer na parte aérea, nos tecidos do caule, folhas, flores e frutos, contudo, em razão da alta incidência de radiação ultravioleta, a baixa disponibilidade de água e a escassez de nutrientes nessa superfícies, muitas vezes limitam colonização direta destes ambientes por bactérias endofíticas. Somam-se à essas dificuldades os mecanismos de defesa da própria planta nestes tecidos. Assim, a principal porta de entrada das bactérias endofíticas é o rizoplane, sendo os vasos do xilema a principal rota para colonização dos demais tecidos vegetais (Hardoim et al., 2015; Pandey et al., 2022).

O processo de colonização por bactérias endofíticas pode ocorrer pelo acesso via entradas naturais como aberturas nas raízes, pelos radiculares, estômatos, hidatódios localizados nos brotos, feridas e, também por meio da fixação ao rizoplane onde exploram potenciais pontos de entrada no sistema radicular (Kandel et al., 2017).

Na rizosfera, principal porta de entrada das bactérias endofíticas, encontram-se os grupos de bactérias endofíticas mais importantes para o crescimento, desenvolvimento e proteção das plantas por meio da produção de bioativos, supressão de doenças e biorremediação (Zhao et al., 2024).

A colonização da rizosfera por bactérias endofíticas tem início com a migração quimioestática em direção aos tecidos radiculares em resposta aos exsudatos radiculares e metabólitos secundários produzidos pela planta (Sena et al., 2024). Estima-se que as plantas

empreguem de 5 a 21% dos seus fotoassimilados no processo de atração e recrutamento de microrganismos na rizosfera (Jha et al., 2018). Nesta etapa flagelo e pili apresentam-se como importantes acessórios para impulsionar as bactérias em direção à raiz, permitindo que superem qualquer repulsão eletrostática da superfície radicular (Knights et al., 2021).

A segunda etapa constitui-se na fixação à superfície radicular, onde a bactéria adere-se de forma estável ao rizoplane (White et al., 2019). É nessa etapa que tem início o processo de comunicação cruzada entre planta e bactéria, realizada por meio da secreção de substâncias sinalizadoras que promovem a colonização preferencial (Bitla et al., 2017). Uma vez fixado ao rizoplane o microrganismo inicia o processo de entrada e distribuição nos tecidos, podendo a entrada acontecer por meio de feridas, fissuras decorrentes da emissão de raízes adventícias e secundárias, por meio de pelos radiculares ou entre células não danificadas (Liu et al., 2017). Estima-se que o processo de colonização da rizosfera dure uma semana e, somente depois de concluído, as bactérias endofíticas iniciam o processo de colonização da parte aérea por meio da migração via xilema e produção de celulasas e pectinases que auxiliam no rompimento das paredes celulares (Jha et al., 2018).

O processo de colonização da parte aérea é parcialmente derivado do processo de seleção e translocação de bactérias recrutadas na rizosfera (Hardoim et al., 2015). Alternativamente essas bactérias podem acessar o interior da folha por aberturas naturais (estômatos e hidatódios) ou por ranhuras ou feridas decorrentes do vento, ataque de insetos ou patógenos (Liu et al., 2017).

Para evitar o mecanismo de defesa das plantas baseado no aumento da produção de espécies reativas de oxigênio (ROS - reactive oxygen species) as bactérias endofíticas podem conter um alto número e uma grande diversidade de genes que codificam enzimas direcionadas à eliminação das ROS, tais como superóxido dismutase (SOD) e glutatona redutase (GR) (Liu et al., 2017).

2.3. Benefícios da colonização endofítica

Uma vez no interior dos tecidos vegetais, os microrganismos endofíticos podem trazer uma série de benefícios às plantas hospedeiras, influenciando positivamente o seu crescimento (Ameen et al., 2024). Diferente dos microrganismos benéficos que habitam a superfície dos tecidos vegetais, no rizoplaneo ou na parte aérea, os endofíticos oferecem mecanismos de promoção de crescimento que, na maioria das vezes, podem ser entregues dentro do próprio tecido vegetal em que habitam (Ercole et al., 2025). Os principais mecanismos de promoção de crescimento podem ser diretos, como a fitoestimulação e a biofertilização e indiretos, como a supressão de patógenos, proteção contra pragas e herbívoros, indução de resistência ao estresse e rizorremediação (Compant et al., 2016).

2.3.1. Fitoestimulação por meio da modulação dos níveis de fitohormônios

Microrganismos endofíticos podem modular os níveis de compostos diretamente relacionados ao crescimento e à resistência das plantas ao estresse ambiental, como o ácido abscísico, ácido jasmônico, giberelinas, citocininas, ácido salicílico e o etileno (Chakraborty et al., 2025). O aumento da produção e concentração destes fitohormônios promovida pelos hospedeiros endofíticos pode ser uma das chaves que mantem a harmonica relação entre planta e endofítico (Zhao et al., 2024).

Em girassol, a inoculação do fungo endofítico *Fusarium proliferatum*, isolado de plantas de *Rhazya stricta*, promoveu melhoria do crescimento e aumento da resistência ao estresse hídrico, sendo o efeito atribuído à regulação da produção de fitohormônios, metabólitos diretamente ligados à resistência ao estresse, proteínas, açúcares de baixo peso molecular e destruição de espécies reativas de oxigênio (ROS) (Semma et al., 2023). Quando inoculado em

plantas de batata, a cepa endofítica *Bacillus subtilis* 26D (Cohn), foi capaz de reduzir significativamente os danos causados pelo ataque de *Leptinotarsa decemlineata* por meio da manutenção de altos níveis de citocininas, ácido indol-3-acético (AIA), ácido abscísico (ABA) que promoveram a rápida recuperação e altas taxas de crescimento da parte aérea (Sorokan et al., 2021). Em plantas de trigo este mesmo isolado foi capaz de aumentar a resistência ao ataque de pulgões (*Rhopalosiphum padi* L.) por meio da indução da resistência sistêmica utilizando o mecanismo de priming, que inclui a reprogramação do genoma da planta (Rumyantsev et al., 2023).

Um estudo onde bactérias endofíticas, isoladas de plantas de *Coffea arabica* L. e *Coffea robusta* L. no Brasil, foram inoculadas nas sementes antes do plantio demonstrou que *Escherichia fergusonii*, *Acinetobacter calcoaceticus* e *Salmonella enterica* são capazes de promover o crescimento da planta, sendo o resultado atribuído à produção de fitohormônios e melhoria das condições na rizosfera. No mesmo experimento verificou-se que isolados de *Brevibacillus choshinensis*, *S. enterica*, *Pectobacterium carotovorum*, *Bacillus megaterium* (*Priestia megaterium*), *Microbacterium testaceum* e *Cedecea davisae* reduziram a severidade da ferrugem do cafeeiro (*Hemileia vastatrix*) em ensaio in vitro, sendo o resultado atribuído à indução de resistência sistêmica pela sensibilização do tecido colonizado pelas bactérias endofíticas e, também, à produção de substância antimicrobianas que inibem a germinação do esporo fúngico (Silva et al., 2012).

Em trigo, a bactéria endofítica *Burkholderia ambifaria* XN08 foi capaz de promover o crescimento de plantas pela produção de fitohormônios, indução da resistência sistêmica pelo aumento da atividade das enzimas polifenol oxidase (PPO), peroxidase (POD) e fenilalanina amônia-liase (PAL) e redução da incidência do fungo *Rhizoctonia cerealis* por meio da produção do antifúngico pirrolnitrina (An et al., 2022).

2.3.2. Biofertilização

A biofertilização à base de microrganismos destaca-se entre as estratégias de sucesso dos cultivos sustentáveis por beneficiar-se de relações ecológicas bem sucedidas que podem promover o aumento de crescimento de plantas por diversos mecanismos tais como, fixação biológica de nitrogênio, solubilização de fósforo, produção de sideróforos, proteção contra ataque de pragas e patógenos e melhoria das condições na rizosfera, podendo estes mecanismos aumentar consideravelmente a produção e a sustentabilidade dos cultivos agrícolas (Kumar et al., 2024).

O nitrogênio destaca-se por ser o nutriente que mais limita o crescimento vegetal em virtude da necessidade de um intermediário biológico capaz de reduzir o nitrogênio (N_2) atmosférico à amônia para ser usado pelas plantas, fazendo com que grande parte da demanda deste nutriente nos cultivos agrícolas seja suprida por fertilizantes químicos, cuja produção é associada ao alto consumo de energia e emissão de gases do efeito estufa e, o uso destes fertilizantes implica muitas vezes em contaminação dos mananciais de água. Assim, a busca por estratégias capazes de promover ou aumentar a fixação biológica de nitrogênio em plantas de interesse comercial tem tornado-se cada vez mais atrativa (Gupta et al., 2012).

Dada elevada demanda e baixa eficiência da fertilização nitrogenada em cereais (~34%), vários trabalhos têm buscado microrganismos fixadores de nitrogênio capazes de estabelecer simbioses com estas plantas, destacando-se as bactérias endofíticas *Azorhizobium caulinodans* e *Gluconacetobacter diazotrophicus*, capazes de fixar grandes quantidades de nitrogênio quando associadas à plantas de milho, cana-de-açúcar e trigo e *Azospirillum brasiliense*, responsável pela fixação de quantidades significativas de nitrogênio em *Setaria viridis* e *Setaria italica* (milheto) (Guo et al., 2023).

Plantas de milho, inoculadas com a bactéria diazotrófica *Bacillus* B2L2 e com a bactéria *Klebsiella* MK2R2, isoladas de plantas de *Triticum vulgare* e *Phragmites australis* apresentaram maior crescimento e produtividade, sendo os resultados associados à fixação biológica de nitrogênio, aumento da produção de ácido indolacético e de sideróforos (Mowafy et al., 2021).

Diferente das leguminosas que conseguem fixar pelo menos parte do nitrogênio demandado, ainda é preciso aperfeiçoar o processo de fixação biológica de nitrogênio nos cereais. O aumento do número de trabalhos bem sucedidos de bioprospecção de microrganismos fixadores de nitrogênio e a melhor compreensão dos processos de colonização das plantas por estes microrganismos permite a proposição de culturas de cereais que, futuramente, possam tornar-se autossuficientes ou “autofertilizantes” em nitrogênio, seja pelo aperfeiçoamento de relações ecológicas de fixação biológica já existentes ou indução destas relações por meio da modificação das plantas, chamadas culturas autofertilizantes de primeira geração, ou por meio da fixação autônoma de nitrogênio por essas plantas propiciada pela inserção de genes de fixação biológica no próprio genoma do vegetal, promovendo a criação de culturas autofertilizantes de segunda geração (Guo et al., 2023).

Não menos importante, o fósforo é um macronutriente primário essencial ao crescimento das plantas e, normalmente, pouco disponível no solo, fazendo com que microrganismos capazes de solubilizar esse nutriente no solo sejam de grande valia para os cultivos agrícolas, destacando-se as bactérias rizosféricas *B. velezensis*, *B. subtilis*, *B. cereus*, *B. thuringiensis*, *B. pumilus* e *P. megaterium* (Ercole et al., 2025), os fungos não micorrízicos dos gêneros *Penicillium*, *Fusarium*, *Aspergillus*, *Alternaria*, *Helminthosporium*, *Arthrobotrys* e *Trichoderma* e os fungos micorrízicos *Rhizophagus irregularis*, *Glomus mossea*, *G. fasciculatum* e *Entrophospora colombiana* (Elias et al., 2016; Silva et al., 2023). Dentre esses, destacam-se os microrganismos que estabelecem a colonização endofítica e apresentam

capacidade de conversão do fósforo insolúvel em fósforo solúvel por meio da secreção de ácidos orgânicos e fosfatases (Lacava et al., 2021).

Os fungos endofíticos *Penicillium chrysogenum*, *Penicillium crustosum* e as bactérias endofíticas *Bacillus cereus* e *Bacillus subtilis*, isoladas de *Teucrium polium* L. promoveram significativa solubilização de fósforo quando inoculadas em plantas de milho recém germinadas, sendo o resultado atribuído à produção e secreção de ácidos orgânicos e, também, por meio da excreção de prótons ou produção de enzimas que liberam formas insolúveis de fósforo ou mineralizam o nutriente da fração orgânica (Hassan, 2017). Em solos ácidos, onde o fósforo é fortemente ligado à óxidos de ferro e alumínio e, também, à forma precipitados de Fe e Al, a prospecção de microrganismos endofíticos capazes de reverter esta imobilização pode garantir a sustentabilidade dos cultivos. Um experimento utilizando *Streptomyces* sp. CoT10, isolado de plantas de *Camellia oleifera*, demonstrou que este microrganismo é capaz de aumentar em até 15% a mobilização de fósforo e ferro insolúveis no solo por meio da liberação de sideróforos (Cui et al., 2022). Quando inoculado em mudas de pepino o fungo endofítico *Talaromyces verruculosus*, isolado de plantas de *Acer truncatum*, promove o aumento do crescimento e a redução do estresse do sistema fotossintético causado pela carência do nutriente da planta por meio da solubilização do fósforo ligado ao cálcio (Zeng et al., 2024).

Em arroz, o fungo endofítico *Phomopsis liquidambaris*, isolado de *Bischofia polycarpa*, é capaz de aumentar o rendimento de grãos em até 23% e o acúmulo de nitrogênio (N), fósforo (P), ferro (Fe), manganês (Mn), zinco (Zn), molibdênio (Mo) e selênio (Se) em 20,5%, 18,9%, 18,2%, 9,5%, 17,9%, 13,3% e 17,1%, respectivamente, sendo o efeito atribuído à regulação positiva dos transportadores de nutrientes, aumentando a eficiência de absorção e remobilização dos nutrientes na planta (Tang et al., 2022).

2.3.3. Supressão de patógenos e proteção contra pragas e herbívoros

A crescente demanda por medidas sustentáveis para o controle de pragas e doenças na agricultura faz com que a microbiota endofítica seja uma excelente estratégia para o biocontrole (Lacava & Azevedo, 2013). A diversidade de estratégias de proteção propiciada pelos endofíticos como a indução de resistência sistêmica, produção de compostos orgânicos voláteis e secreção de substâncias antimicrobianas, faz desses microrganismos uma rica fonte para o desenvolvimento de produtos que permitam a redução do uso de fertilizantes, fungicidas, bactericidas, inseticidas e herbicidas nos cultivos agrícolas (Rabbee et al., 2024).

Os fungos endofíticos, antes vistos como presenças não prejudiciais às plantas hospedeiras, hoje representam um tesouro com vasto potencial de biocontrole patógenos, podendo promover o controle por mecanismos antagônicos diretos, como a antibiose, a exclusão competitiva, o parasitismo e a redução da virulência, ou por mecanismos indiretos como a indução de resistência e a estimulação da produção de metabólitos secundários (Bhardwaj et al., 2023).

Na antibiose, o colonizador hospedeiro é capaz de produzir metabólitos capazes de reduzir ou impedir o crescimento do patógeno (Adeleke et al., 2022). Em pinheiro (*Pinus halepensis*), a inoculação dos fungos endofíticos *Trichoderma* spp., *Aureobasidium pullulans*, *Aureobasidium* spp. e *Leotiomyce* spp., isolados de pinheiros saudáveis, são capazes de reduzir o dano da doença do cancro, causada pelo patógeno *Gremmeniella abietina* (Romeralo et al., 2015).

Bactérias endofíticas podem reduzir ou inibir o ataque de fungos patogênicos contra seus hospedeiros por diversos mecanismos, tais como, (I) antibiose, por meio da produção de antibióticos, ou e metabólitos secundários, (II) produção e secreção de enzimas líticas, como quitinases, proteases e beta-1,3-glucanase, (III) competição por sítios de colonização e

nutrientes; (IV) indução de resistência sistêmica e. (V) interrupção de mecanismos de quorum sensing (Tiwari et al., 2023; ALI et al., 2024).

A cepa endofítica *Bacillus subtilis* CB2, isolada de plantas de trigo no Irã, é capaz de interromper a germinação de esporos de *Fusarium graminearum* e *Xanthomonas translucens* na planta por meio da produção de surfactinas e iturinas, lipopeptídeos que apresentam propriedades antibacterianas e antifúngicas (Taheri et al., 2023). Em gengibre, bactérias endofíticas isoladas do rizoma podem reduzir o crescimento do oomiceto patogênico *Pythium myriotylum* por meio da produção de enzimas líticas (Alarjan & Elshikh, 2024). Um estudo utilizando 80 bactérias endofíticas isoladas de sementes de milho capazes de produzir as enzimas líticas amilase, esterase, lipase, protease, celulase e pectinase demonstrou que pelo menos metade dos isolados é capaz de produzir pelo menos uma das enzimas e que dez deles são capazes de produzir as seis enzimas simultaneamente, confirmando o potencial das bactérias endofíticas na produção de enzimas líticas (Bodhankar et al., 2017).

Microrganismos endofíticos são capazes de promover eventos de resistência sistêmica em plantas hospedeiras, reduzindo a incidência e a severidade de ataques de patógenos por meio da ativação de enzimas de defesa como a L-fenilalanina amônia-liase (PAL), responsável pela indução da produção de ácido salicílico (AS), peroxidase (POD), importante na defesa em casos de ferimentos, infecções e estresse oxidativo, polifenoloxidase (PPO) que atua na oxidação de compostos fenólicos e, também, induzem a produção de enzimas relacionadas à patogênese, como a β -1,3 glucanase, capaz de catalisar a clivagem hidrolítica de ligações do tipo endo β -1,3-D-glucosídicas de β -1,3-D-glucanas da parede celular de fungos (Jacob et al., 2020).

Quando pulverizado em folhas de milho a bactéria endofítica *Bacillus subtilis* DZSY21, isolada de folhas de *Eucommia ulmoides* é capaz de reduzir a incidência de *Bipolaris maydis* por meio da produção de lipopeptídeos anti fúngicos, que causam a deformação do protoplasma do patógeno, e ativação de resposta sistêmica induzida pelas vias de sinalização dependentes

de ácido salicílico (AS) e ácido jasmônico (AJ) (Ding et al., 2017). A aplicação de *Bacillus pumilus* R190 e *Bacillus subtilis* 6051 em folhas e sementes de milho é capaz de reduzir a incidência da estria bacteriana do milho, causada por *Xanthomonas vasicola* pv. *vasculorum* por meio da indução de resistência sistêmica e competição por sítios de colonização na rizosfera (Bathke et al., 2022).

Em cultivos de uva, as bactérias endofíticas *Pseudomonas* sp. Sn48 e *Pantoea* sp. Sa14, isoladas de videiras domésticas, são capazes de reduzir a incidência da galha da coroa, causada por *Agrobacterium tumefaciens* por meio da indução de resistência sistêmica (IRS) com o aumento da produção de fitoalexinas, que são compostos antimicrobianos de baixo peso molecular produzidos pela planta em resposta à infecções (Asghari et al., 2020).

O termo *quorum sensing* (QS) é utilizado para descrever a comunicação entre células bacterianas que promove a realização de movimentos coordenados em função da densidade populacional, permitindo a interação dessas populações bacterianas com plantas e animais, utilizando para esta sinalização compostos N-acil-homoserina lactona (AHL) e peptídeos cíclicos (Paul et al., 2023). O *quorum sensing* (QS) está envolvido em uma série de processos patogênicos mas, também, é responsável por processos essenciais tais como a fitoestimulação, biofertilização, biorremediação, promoção do crescimento de plantas, colonização endofítica e epifítica e supressão e controle de doenças. Mesmo tendo finalidade comum, o processo de *quorum sensing* é sinalizado por moléculas diferentes em bactérias gram-positivas, onde a sinalização ocorre por oligopeptídeos e gram-negativas que utilizam N-acil-homoserina lactona (AHL) (Joo et al., 2021).

Muitas bactérias endofíticas apresentam mecanismos de *quorum sensing* (QS) mas podem deter também estratégias de *quorum quenching* (QQ) capazes de degradar sinais de *quorum sensing* (QS) e reduzir ou impedir o crescimento de patógenos vegetais. No *quorum sensing* (QS), as proteínas AHL-sintase e a proteína receptora AHL atuam efetivamente no

mecanismo de orientação enquanto o mecanismo de quorum quenching (QQ) atua na interrupção desses sinais (Kamath et al., 2023).

A cepa *Burkholderia* sp. KJ006, isolada de raízes de arroz e geneticamente modificada pela inserção N-acil-homoserina lactonase (aiiA), mostrou-se eficiente na inibição do *quorum sensing* (QS) (*in vitro*) e na redução da incidência da podridão de mudas de arroz causada por *Burkholderia glumae* (Cho et al., 2007). Em citros, as bactérias endofíticas *Bacillus cereus* Si-Ps1 e *Pseudomonas azotoformans* La-Pot3-3, isoladas de *Citrus sinensis* e *C. sinensis* var. Thomson, foram capazes de reduzir o mecanismo de *quorum sensing* (QS) de *Pseudomonas syringae* pv. *syringae*, também pelo mecanismo de interrupção da sinalização de N-acil-homoserina lactona (AHL) (Kiarood et al., 2020).

Alguns fungos endofíticos podem produzir compostos tóxicos para herbívoros, podendo o efeito de toxicidade ser transmitido para segunda geração do herbívoro, mesmo que este não esteja se alimentando da planta colonizada pelo endofítico (Pirttilä et al., 2023). A colonização do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris*) pelo fungo endofítico e entomopatógeno *Beauveria bassiana* dificulta a ação do ácaro parasita *Tetranychus urticae* Koch por indução dos mecanismos de resistência sistêmica da planta (Khoury, 2021).

A maior parte dos relatos na literatura retratam os fungos endofíticos como potenciais promotores de mecanismos de defesa anti-herbivoria em plantas, principalmente os fungos clavicipitaceus como os do gênero *Epichloë* que colonizam os tecidos vegetais e produzem uma série de compostos alcalóides com efeito anti herbivoria (Backman & Sikora, 2008; White et al., 2019).

As bactérias entomopatogênicas também constituem-se de grandes aliadas para o biocontrole de insetos praga, contudo, pouco se conhece sobre o papel das bactérias entomopatogênicas que estabelecem relações endofíticas com plantas. Em plantas de arroz a aplicação da bactéria endofítica *Serratia marcescens* em sementes promove o aumento na

germinação no crescimento da planta, possivelmente pela aumento da produção de ácido indolacético (AIA), e resistência contra o ataque da cigarrinha marrom (*Nilaparvata lugens*) atribuída ao aumento da presença de metabólitos secundários nas plantas colonizadas (Niu et al., 2022).

A possibilidade de utilização de bactérias entomopatogênicas em associações endofíticas tem despertado a comunidade científica para o desenvolvimento de estratégias capazes de substituir tecnologias transgênicas como *Bt* por plantas que contenham naturalmente o endofítico entomopatogênico. Em plantas de berinjela verificou-se a viabilidade de estabelecimento da colonização endofítica de *Bacillus thuringiensis* VKK-BB2 (Bt) para o controle da broca do fruto e do broto (*Leucinodes orbonalis* Guenee). Mesmo com baixa mortalidade de insetos, o experimento evidenciou a viabilidade do uso dessa tecnologia como alternativa ao controle químico da praga (Pola et al., 2022).

2.4. Papel da colonização endofítica na atenuação do estresse abiótico em um cenários de mudanças climáticas

As plantas, organismos sésseis, enfrentam a exposição contínua à um ou vários fatores ambientais estressantes, tais como calor, frio, seca, salinidade, alagamento, toxicidade por metais pesados, deficiência de nutrientes no solo, herbívoros, pragas e patógenos. A acentuação destas condições pelas mudanças climáticas pode comprometer severamente a sobrevivência dos ecossistemas e o fornecimento de alimentos no planeta (Sena et al., 2024).

Nesse contexto de acentuação das condições ambientais adversas, os microrganismos endofíticos representam estratégia promissora para utilização como atenuadores do estresse ambiental e garantia da saúde das plantas em condições de estresse ambiental, podendo atuar

como nanofábricas de compostos promotores de crescimento, atenuadores do estresse ambiental e protetores contra o ataque de patógenos (Ghosh & Das, 2022; Gurung et al., 2023).

Dentre os mecanismos proporcionados pela colonização endofítica para atenuação dos efeitos do estresse destacam-se aqueles direcionados à redução do estresse abiótico, causado pela ausência de nutrientes, seca, alagamento, estresse térmico, salino e a presença de metais pesados e, também, a redução do estresse biótico, causado por patógenos, pragas e herbívoros (Sena et al., 2024).

Os benefícios proporcionados pela colonização endofítica em cenários de estresse ambiental podem ser diretos, por meio da melhoria da aquisição de nutrientes, promoção do crescimento e desenvolvimento da planta, ou indiretos, onde a presença do endofítico promove o biocontrole de agentes que podem comprometer a saúde da planta (Anand et al., 2023).

Quando submetidas à condições de temperaturas elevadas, os endofíticos podem aumentar a síntese de proteínas de choque térmico, ativar proteínas quitinases e afetar expressão do gene *SPeacCHless* para regular o tamanho da câmara estomática (Cui et al., 2023). Em cultivo de pepino, um fungo endofítico identificado por caracterização molecular como *Thermomyces* sp., isolado de raízes de *Cullen plicata* demonstrou potencial para atenuar o estresse térmico nas plantas promovendo o melhor funcionamento dos sistemas antioxidantes para proteção contra o estresse oxidativo. Verificou-se ainda que as plantas inoculadas com *Thermomyces* mantiveram o fotossistema II funcionando por mais tempo e apresentaram abertura estomática mais lenta e menor transpiração em condição de estresse térmico quando comparadas às plantas não inoculadas (Ali et al., 2018).

A bactéria endofítica *Bacillus coagulans* LB6, isolada de plantas de arroz, é capaz de promover o crescimento das plantas quando inoculada na cultura por da atenuação dos efeitos do estresse térmico pela modulação da produção de fitohormônio, aumento da aquisição de nutrientes e redução do estresse oxidativo (Dlamini et al., 2025).

Quando submetidas ao estresse salino, as plantas colonizadas por endofíticos também podem apresentar vantagens adaptativas, como a promoção da melhoria dos processos de osmorregulação, da fotossíntese, aumento da atividade dos sistemas antioxidantes e pela melhoria dos processos de absorção de nutrientes (Cui et al., 2024). Plantas de alface, tomate e pimentão, expostas às condições simuladas de seca e salinização solo, apresentaram maiores taxas de sobrevivência e maiores produtividades quando inoculadas com fungos endofíticos isolados de raízes de *Distichlis spicata* no Deserto do Atacama (*Penicillium fuscoglaucum* e *Penicillium glabrum*), de raízes de *Hordeum comosum* nos Andes e de raízes *Deschampsia antarctica* na Antártida (*Penicillium rubens* e *Penicillium bialowiezense*), tendo a inoculação de um consórcio com os seis endofíticos apresentado os melhores resultados. A colonização pelos fungos endofíticos levou ao aumento das concentrações de fenóis totais e prolina nas folhas e redução da peroxidação lipídica quando as plantas foram expostas à seca e salinidade do solo (Ballesteros et al., 2024).

A compreensão da natureza e do funcionamento da colonização endofítica tem relevado o gigantesco potencial de exploração destas relações para agricultura, em que fungos e bactérias endofíticas já têm demonstrado efetividade na promoção do crescimento e desenvolvimento das plantas, redução ou inibição do ataque de patógenos, pragas e herbívoros e na resistência aos diversos estresses ambientais, principalmente daqueles que têm sido acentuados pelos eventos de mudanças climáticas (Tabela 1).

Tabela 1 – Fungos e bactérias endofíticas com potencial de promoção de benefícios agrônômicos às plantas colonizadas

Endofítico	Prospecção	Planta colonizada	Mecanismo de ação do endofítico	Referência
<i>Fusarium proliferatum</i>	<i>Rhazya stricta</i>	Girassol	Regulação da produção de fitohormônios e aumento da resistência ao estresse hídrico.	Semma et al., 2023
<i>Bacillus subtilis</i> 26D (Cohn)	-	Batata	Redução dos danos causados por insetos por meio da rápida recuperação dos tecidos e aumento do crescimento da parte aérea.	Sorokan et al., 2021
<i>Bacillus subtilis</i> 26D (Cohn)	-	Trigo	Resistência ao ataque de pulgões por meio da indução da resistência sistêmica e interferência de RNA (RNAi).	Rumyantsev et al., 2023
<i>Escherichia fergusonii</i> , <i>Acinetobacter calcoaceticus</i>	<i>Coffea arabica</i> L. e <i>Coffea robusta</i> L.	<i>Coffea arabica</i> L. e <i>Coffea robusta</i> L.	Promoção de crescimento por meio da produção de fitohormônios e colonização da rizosfera.	Silva et al., 2012

Endofítico	Prospecção	Planta colonizada	Mecanismo de ação do endofítico	Referência
e <i>Salmonella enterica</i>				
<i>Brevibacillus choshinensis</i> , <i>S. enterica</i> , <i>Pectobacterium carotovorum</i> , <i>Bacillus megaterium</i> , <i>Microbacterium testaceum</i> e <i>Cedecea davisae</i>	<i>Coffea arabica</i> L. e <i>Coffea robusta</i> L.	<i>Coffea arabica</i> L. e <i>Coffea robusta</i> L.	Redução da severidade da ferrugem do cafeeiro (<i>Hemileia vastatrix</i>) por meio da indução de resistência sistêmica e inibição da germinação dos esporos do patógeno.	Silva et al., 2012
<i>Burkholderia ambifaria</i> XN08	Trigo (<i>Triticum aestivum</i> L.)	Trigo (<i>Triticum aestivum</i> L.)	Aumento do crescimento de planta pela produção de fitohormônios, indução da resistência sistêmica pelo aumento da atividade da polifenol oxidase (PPO), peroxidase (POD) e	An et al., 2022

Endofítico	Prospecção	Planta colonizada	Mecanismo de ação do endofítico	Referência
			fenilalanina amônia-liase (PAL) e redução da incidência do fungo <i>Rhizoctonia cerealis</i> por meio da produção do antifúngico pirrolnitrina.	
<i>Bacillus</i> B2L2	<i>Triticum vulgare</i> e <i>Phragmites australis</i>	Milho	Promoção de crescimento e aumento de produtividade associada à fixação de nitrogênio, produção de ácido indolacético e sideróforos.	Mowafy et al., 2021
<i>Penicillium chrysogenum</i> , <i>Penicillium crustosum</i> , <i>Bacillus cereus</i> e <i>Bacillus subtilis</i>	<i>Teucrium polium</i> L.	Milho	Solubilização de fósforo por meio da secreção da produção e secreção de ácidos orgânicos e, também, por meio da excreção de prótons ou produção de enzimas que liberam formas insolúveis de fósforo ou mineralizam	Hassan, 2017

Endofítico	Prospecção	Planta colonizada	Mecanismo de ação do endofítico	Referência
			o nutriente da fração orgânica.	
<i>Streptomyces</i> sp. CoT10	<i>Camellia</i> <i>oleifera</i>	<i>Camellia</i> <i>oleifera</i>	Aumento do crescimento pela mobilização de fósforo ligado ao ferro mediada pela liberação de sideróforos.	Cui et al., 2022
<i>Talaromyces</i> <i>verruculosus</i>	<i>Acer</i> <i>truncatum</i>	Pepino	Aumento do crescimento e a redução do estresse do sistema fotossintético causado pela carência do nutriente da planta por meio da solubilização do fósforo ligado ao cálcio.	Zeng et al., 2024
<i>Phomopsis</i> <i>liquidambaris</i>	<i>Bischofia</i> <i>polycarpa</i>	Arroz	Aumento do rendimento de grãos e do acúmulo de nutrientes (N, P, Fe, Mn, Zn, Mo e Se) por meio da regulação positiva dos transportadores de nutrientes e do	Tang et al., 2022

Endofítico	Prospecção	Planta colonizada	Mecanismo de ação do endofítico	Referência
			aumentando a eficiência de absorção e remobilização dos nutrientes na planta.	
<i>Trichoderma</i> spp., <i>Aureobasidium pullulans</i> , <i>Aureobasidium</i> spp. e <i>Leotiomyces</i> spp	Pinus (<i>Pinus halepensis</i>)	Pinus (<i>Pinus halepensis</i>)	Redução da extensão das lesões causadas por <i>Gremmeniella abietina</i> por meio da redução do crescimento e estabelecimento do patógeno por antibiose.	
<i>Bacillus subtilis</i> CB2	Trigo	Trigo	Redução da severidade do ataque de <i>Fusarium graminearum</i> e <i>Xanthomonas translucens</i> na planta por meio da produção de surfactinas e iturinas.	Taheri et al., 2023
<i>Bacillus licheniformis</i>	Gengibre	Gengibre	Reduzir o crescimento de <i>Pythium myriotylum</i> por	Alarjan & Elshikh, 2024

Endofítico	Prospecção	Planta colonizada	Mecanismo de ação do endofítico	Referência
			meio da produção de enzimas líticas	
<i>Bacillus subtilis</i> DZSY21	<i>Eucommia ulmoides</i>	Milho	Inibição do crescimento de <i>Bipolaris maydis</i> em milho por meio da produção de lipopeptídeos antifúngicos e ativação de resposta sistêmica induzida pelas vias de sinalização dependentes de ácido salicílico (AS) e ácido jasmônico (AJ).	Ding et al., 2017
<i>Bacillus pumilus</i> R190 e <i>Bacillus subtilis</i> 6051	-	-	Redução da incidência e severidade da estria bacteriana do milho causada por <i>Xanthomonas vasicola</i> pv. <i>vasculorum</i> por meio da indução de resistência sistêmica e competição por sítios de colonização na rizosfera.	Bathke et al., 2022

Endofítico	Prospecção	Planta colonizada	Mecanismo de ação do endofítico	Referência
<i>Pseudomonas</i> sp. Sn48 e <i>Pantoea</i> sp. Sa14	Uva (<i>Vitis vinifera</i>)	Uva (<i>Vitis vinifera</i> 'Chardonnay')	Redução da incidência da galha da coroa, causada por <i>Agrobacterium tumefaciens</i> por meio da indução de resistência sistêmica (IRS) com o aumento da produção de fitoalexinas.	Asghari et al., 2020
<i>Burkholderia</i> sp. KJ006	Arroz	Arroz	Redução da incidência de podridão de raízes causada por <i>Burkholderia glumae</i> por meio da inibição do mecanismo de <i>quorum sensing</i> do patógeno.	Cho et al., 2007
<i>Bacillus cereus</i> Si-Ps1 e <i>Pseudomonas azotoformans</i> La-Pot3-3	<i>Citrus sinensis</i> e <i>C. sinensis</i> var. Thomson	<i>Citrus sinensis</i>	Redução do mecanismo de <i>quorum sensing</i> de <i>Pseudomonas syringae</i> pv. <i>syringae</i> , pela interrupção da sinalização de N-acil-homoserina lactona (AHL).	Kiarood et al., 2020

Endofítico	Prospecção	Planta colonizada	Mecanismo de ação do endofítico	Referência
<i>Beauveria bassiana</i>	Vespa da madeira (<i>Cephalcia tannourinensis</i>)	Feijão (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	Redução do ataque pelo parasita <i>Tetranychus urticae</i> Koch por indução dos mecanismos de resistência sistêmica da planta.	Khoury, 2021
<i>Serratia marcescens</i>	<i>Nilaparvata lugens</i>	Arroz	Aumento da germinação do crescimento de plantas pelo aumento da produção de ácido indolacético (AIA) e redução do ataque de <i>Nilaparvata lugens</i> em razão do aumento da produção de metabólitos secundários em plantas colonizadas.	Niu et al., 2022
<i>Thermomyces</i> sp.	<i>Cullen plicata</i>	Pepino	Atenuação dos efeitos do estresse térmico por meio da otimização do funcionamento dos sistemas antioxidantes	Ali et al., 2018

Endofítico	Prospecção	Planta colonizada	Mecanismo de ação do endofítico	Referência
			para proteção contra o estresse oxidativo e melhoria do funcionamento do aparato fotossintético.	
<i>Bacillus coagulans</i> LB6	Arroz (<i>Oryza sativa</i>)	Arroz (<i>Oryza sativa</i>)	Aumento do crescimento das plantas e atenuação dos efeitos do estresse térmico por meio da modulação da produção de fitohormônio, aumento da aquisição de nutrientes e redução do estresse oxidativo.	Dlamini et al., 2025

3. Potencial agrônômico e desenvolvimento de bioinsumos a partir de microrganismos endofíticos

Os endofíticos têm se apresentado como uma estratégia promissora para a redução do uso de fertilizantes e pesticidas na agricultura, contudo, mesmo com todo potencial de alteração da biologia dos vegetais e melhoria dos sistemas de produção agrícola, as relações endofíticas

e a utilização de microrganismos endofíticos como bioinsumos ainda é pouco compreendida e explorada (Adeleke et al., 2022).

Os bioinsumos são produtos sustentáveis produzidos a partir de células microbianas e metabólitos, materiais vegetais, materiais orgânicos ou naturais, destinados à melhoria das condições de crescimento e desenvolvimento das plantas, destacando-se a produção de biofertilizantes, inoculantes e agentes de biocontrole (Rocha et al., 2024).

3.1. Biofertilizantes

Os biofertilizantes são fertilizantes orgânicos de base biológica, produzidos a partir de vegetais ou animais ou de células microbianas vivas ou dormentes, que têm por objetivo aumentar a disponibilidade e acessibilidade de nutrientes para as plantas (Chaudhary et al., 2022).

Diferentes táxons microbianos apresentam representantes endofíticos com potencial para utilização em biofertilizante, podendo ser utilizados individualmente ou em consórcios microbianos, fazendo dos endofíticos candidatos potenciais para o desenvolvimento de uma nova linha de biofertilizantes microbianos altamente especializados em estabelecer relações positivas com as plantas (Yadav et al., 2021).

No cultivo do tomateiro (*Solanum lycopersicum*) a utilização de biofertilizante comercial à base de *Rhizobium* aumenta o valor nutritivo dos frutos, elevando o conteúdo de vitamina C e de antioxidantes, mesmo na ausência de nodulação das plantas, demonstrando a viabilidade de utilização deste endofítico em plantas não-leguminosas (Pereira et al., 2024). Ainda no cultivo do tomateiro (*Lycopersicon esculentum* L.), bactérias endofíticas, isoladas de *Clitoria ternatea* L., promoveram a elevação da produção de auxinas, aumento da capacidade

de solubilização de fosfato, silicatos, potássio e zinco, comprovando o potencial de endofíticos para produção de biofertilizantes de nova geração (Aeron et al., 2021).

O uso de endofíticos na agricultura como biofertilizantes começa a tornar-se realidade, contudo, a necessidade de manutenção do uso de alguns agrotóxicos para obtenção de produtividades satisfatórias ainda pode representar um gargalo no uso destes microrganismos em função da não compatibilidade com alguns agrotóxicos. Assim, a prospecção destes microrganismos deve considerar a compatibilidade com todos os elementos do processo produtivos (Spagnoletti & Chiocchio, 2020). Em raízes de mudas de arroz foram isoladas bactérias endofíticas (*Rhizobium larrymoorei* E2, *Bacillus aryabhatai* E7, *Bacillus aryabhatai* MN1, *Pseudomonas granadensis* T6) promotoras de crescimento vegetal por meio da produção de ácido indolacético (AIA) e fixação biológica de nitrogênio, sendo as quatro cepas resistentes a pelo menos dois fungicidas utilizados no cultivo do arroz (SHEN et al., 2019).

Destaca-se ainda que a prospecção de microrganismos endofíticos para utilização comercial na agricultura deve considerar que colonização endofítica pode ser específica quanto à cultivares, tecidos colonizados e estádios de desenvolvimento da cultura. Em trigo (*Triticum aestivum* L.) a prospecção de bactérias endofíticas isoladas em sementes, raiz, caule e folhas de três cultivares comerciais nos estágios de crescimento, perfilhamento espigamento e enchimento de grãos, revelou grande diversidade ecológica de bactérias promotoras de crescimento entre os órgãos e estádios de desenvolvimento da planta, sendo *Bacillus* o táxon com maior presença nos órgãos e estádios de desenvolvimento e, a raiz da planta como maior reservatório de bactérias endofíticas promotoras do crescimento (PANG et al., 2022).

3.2. Bioinoculantes

Os bioinoculantes são microrganismos benéficos capazes de aumentar o crescimento e a produtividade das plantas, reduzir o uso de fertilizantes e pesticidas químicos e melhorar a qualidade do solo (Kamath et al., 2023). Atualmente, os endofíticos têm ganhado destaque como alternativa potencial para o biocontrole na agricultura, em razão da viabilidade de utilização de uma rede natural de proteção já testada e consagrada no decorrer da evolução (Maitra et al., 2021).

Bactérias endofíticas isoladas de raízes das leguminosas *Vigna radiata*, e *Cajanus cajan* aumentam o crescimento dos seus hospedeiros quando reinoculadas nas plantas (Bhutani et al., 2021). Quando inoculado em sementes germinadas de trigo (*Triticum aestivum* L.), o fungo endofítico *Talaromyces purpurogenus*, isolado da rizosfera e da parte aérea das plantas, é capaz de promover maior crescimento e tolerância à seca por meio da produção de fitohormônios, moléculas sinalizadoras e aumento da atividade de enzimas antioxidantes (Kaur & Saxena, 2023).

3.3. Bioestimulantes

Bioestimulantes são substâncias de origem natural ou sintética e, também, organismos processados que, quando aplicados no solo ou nas plantas promovem o crescimento, a tolerância ao estresse biótico e abiótico, a produtividade e a qualidade das culturas (Ricci et al., 2019).

Dada a grande diversidade de fontes para sua produção, os bioestimulantes podem ser classificados, didaticamente, em: (I) bioestimulantes à base de ácidos húmicos, produzidos no processo de tratamento de solo, fezes de animais, turfa e resíduos agrícolas; (II) bioestimulantes à base de proteínas, produzidos a partir de resíduos vegetais, tecidos animais, aminoácidos,

peptídeos, misturas de proteínas e compostos nitrogenados, poliaminas e aminoácidos não proteicos; (III) bioestimulantes à base de oligossacarídeos, produzidos a partir de paredes celulares microbianas, plantas ou conchas de animais; (IV) bioestimulantes à base de metabólitos, produzidos a partir de metabólitos secundários de plantas e produtos microbianos solúveis; (V) bioestimulantes à base de substâncias inorgânicas e compostos orgânicos naturais ou remodelados; (VI) bioestimulantes microbianos, que contêm microrganismos naturais capazes de desencadear respostas benéficas nas plantas (Jiang et al., 2024).

Em manjerição (*Ocimum basilicum* L.), a aplicação de bioestimulante à base de fungos endofíticos (Asir Horto, Agrotecnologías Naturales SL, Tarragona, Espanha) promove a modulação dos níveis de metabólitos secundários voláteis e não voláteis e reduzindo a intensidade do estresse salino nas plantas sem reduzir a produção de óleos essenciais (Saia et al., 2021).

A utilização da bactéria endofítica *Burkholderia seminalis* 869T2 no cultivo da alface (*Lactuca sativa* var. capitata L.) promove o aumento da produtividade da cultura e melhora a qualidade nutricional das folhas, permitindo ainda a redução dos custos de produção em função da antecipação da colheita e, também o aumento do valor do produto (Hung et al., 2023).

Em algodoeiro (*Gossypium hirsutum* L.), o revestimento de sementes com bioestimulante e bioinseticida Velifer[®] OD (BASF SE, Florham Park, NJ, EUA), à base do fungo endofítico *Beauveria bassiana* PPRI 5339, é capaz de promover o aumento do número de folhas, brotações e gemas apicais, altura da planta, diâmetro do caule e biomassa da planta, reduzindo ainda a infestação pelo pulgão *Aphis gossypii* (Mantzoukas et al., 2023).

3.4. Metabólitos secundários

Os metabólitos secundários são compostos orgânicos, não associados ao crescimento microbiano, produzidos ao final ou próximo à fase estacionária de crescimento com função principal de defesa, competição, sinalização, adaptação e interação com outros seres vivos (Singh et al., 2017). Estes compostos têm, cada vez mais, desempenhado funções importantes em diversas áreas, especialmente na agricultura onde têm sido empregados no biocontrole e na promoção de crescimento de plantas (Alam et al., 2021).

Endofíticos são notadamente produtores de um amplo espectro de metabólitos secundários de interesse agrícola, incluindo alcalóides, flavonóides, ácidos fenólicos, quinonas, esteróides, terpenóides, tetralonas, xantonas e diversos outros compostos promotores de crescimento e garantia da sanidade de plantas (Burraroni & Jeon, 2021; Salehi & Safaie, 2024).

Metabólitos secundários do fungo endofítico *Fusarium* sp., isolado em plantas de milho (*Zea mays*), apresentam propriedades contra o fitopatógeno *Alternaria alternata* isolado de plantas de café (*Coffea arabica*) (Sun et al., 2023). Os fungos endofíticos *Trichoderma longibrachiatum* S12, *Trichoderma asperellum* S11 e *Trichoderma atroviride* PHYTAT7, isolados de plantas de soja, são capazes de reduzir a incidência da podridão radicular causada por *Rhizoctonia solani* por meio da produção de pectinase e quitinase e, também, promover o melhor desenvolvimento da planta por meio da produção de solubilizadores de fósforo (Sallam et al., 2021).

4. Perspectivas e desafios

O uso de microrganismos endofíticos e seus metabólitos secundários na agricultura sustentável é promissor, tornando-se cada vez mais claro à medida que a comunidade científica aprofunda sua compreensão sobre o tema (Nimbulkar et al., 2025).

A viabilidade de utilização dos endofíticos junto à outros produtos, como fertilizantes (Franco et al., 2025), fungicidas (Pagnoletti & Chiocchio, 2020), inseticidas e condicionadores de solo, e evolução de tecnologias de edição genética capazes de alterar as propriedades benéficas destas nanofábricas biológicas (Cho et al., 2007) e a possibilidade de uso dos metabólitos secundários, têm ampliado o espectro de uso dessa tecnologia (Salehi & Safaie, 2024).

A grande diversidade de benefícios promovidos pela colonização endofítica para a planta (Ameen et al., 2024) e a possibilidade de redução do uso de fertilizantes inorgânicos e agrotóxicos, sem perdas de produção e produtividade, parecem fazer dos endofíticos uma tecnologia inevitável para o desenvolvimento e aprimoramento de sistemas agrícolas economicamente e ecologicamente sustentáveis (Chaudhary et al., 2022; Sena et al., 2024).

A comunidade científica ainda tem um longo caminho para o estabelecimento da tecnologia endofítica na agricultura, principalmente nos sistemas de larga escala, demandando testes de patogenicidade em outros organismos, o impacto da inundação por esses microrganismos não-nativos nos diversos ecossistemas e a própria tolerância dos endofíticos ao estresse biótico e abiótico em grandes sistemas agrícolas comerciais (Watts et al., 2023). A grande especificidade dos endofíticos traz vantagens no estabelecimento da colonização, contudo, pode representar um desafio na comercialização em larga escala em função das complexas interações das plantas com as condições ambientais, fazendo com que um mesmo endofítico possa apresentar respostas distintas em ambientes diferentes (Das et al., 2025).

Pesquisas futuras devem atentar-se mais à revisita dos endofíticos já isolados e caracterizados para proposição de tecnologias capazes de inserir esses microrganismos em sistemas agrícolas comerciais e, também, à triagem de endofíticos capazes de transpor a barreira do laboratório para o campo (Kashyap et al., 2023).

5. Conclusões

Fungos e bactérias endofíticas apresentam-se como soluções sustentáveis para o aumento do rendimento dos cultivos agrícolas, biocontrole de patógenos e pragas e a mitigação do estresse ambiental. Contudo, ainda são escassas as informações sobre o real potencial desses microrganismos no desenvolvimento de bioinsumos agrícolas, evidenciando a necessidade de aprofundar as pesquisas que elucidem as possibilidades e desafios dessa tecnologia.

Considerando o sucesso das colonizações endofíticas estabelecido ao longo de milhares de anos de coevolução microrganismo-hospedeiro, os principais desafios para utilização prática dos endofíticos parecem estar mais relacionadas às metodologias de triagem e ao desenvolvimento de produtos comerciais do que aos riscos ambientais associados. No entanto, dos reais impactos ambientais só poderão ser plenamente avaliados quando esses microrganismos forem aplicados em larga escala na agricultura.

Assim, a tecnologia endofítica desponta como uma estratégia promissora para a redução do uso de insumos químicos nos cultivos, contribuindo para a construção de sistemas agrícolas economicamente viáveis e ambientalmente sustentáveis.

6. Referências

- ADELEKE, B. S.; AYILARA, M. S.; AKINOLA, S. A.; BABALOLA, O. O. Biocontrol mechanisms of endophytic fungi. *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, v. 32, n. 1, p. 46, 2022. DOI: <http://doi.org/10.1186/s41938-022-00547-1>
- ADELEKE, B. S.; FADIJI, A. E.; AYILARA, M. S.; IGIEHON, O. N.; NWACHUKWU, B. C.; BABALOLA, O. O. Strategies to enhance the use of endophytes as bioinoculants in agriculture. *Horticulturae*, v. 8, n. 6, p. 498, 2022. DOI: <http://doi.org/10.3390/horticulturae8060498>
- AERON, A.; DUBEY, R. C.; MAHESHWARI, D. K. Next-generation biofertilizers and novel biostimulants: documentation and validation of mechanism of endophytic plant growth-promoting rhizobacteria in tomato. *Archives of Microbiology*, v. 203, n. 6, p. 3715-3726, 2021. DOI: <http://doi.org/10.1007/s00203-021-02344-0>
- ALAM, B.; LǏ, J.; GĚ, Q.; KHAN, M. A.; GŌNG, J.; MEHMOOD, S.; GŌNG, W. Endophytic fungi: from symbiosis to secondary metabolite communications or vice versa?. *Frontiers in Plant Science*, v. 12, p. 791033, 2021. DOI: <http://doi.org/10.3389/fpls.2021.791033>
- ALARJANI, K. M; ELSHIKH, M. S. Plant growth-promoting and biocontrol traits of endophytic *Bacillus licheniformis* against soft rot causing *Pythium myriotylum* in ginger plant. *Journal of Basic Microbiology*, v. 64, n. 7, p. e2300643, 2024. DOI: <http://doi.org/10.1002/jobm.202300643>

ALI, A. H.; ABDELRAHMAN, M.; RADWAN, U.; EL-ZAYAT, S.; EL-SAYED, M. A.

Effect of *Thermomyces* fungal endophyte isolated from extreme hot desert-adapted plant on heat stress tolerance of cucumber. *Applied Soil Ecology*, v. 124, p. 155-162, 2018. DOI:

<http://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.11.004>

ALI, M. A.; AHMED, T.; IBRAHIM, E.; RIZWAN, M.; CHONG, K. P.; YONG, J. W. H. A

review on mechanisms and prospects of endophytic bacteria in biocontrol of plant pathogenic fungi and their plant growth-promoting activities. *Heliyon*, v. 10, n. 11, 2024. DOI:

<http://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31573>

AN, C.; MA, S.; LIU, C.; DING, H.; XUE, W. *Burkholderia ambifaria* XN08: A plant

growth-promoting endophytic bacterium with biocontrol potential against sharp eyespot in wheat. *Frontiers in Microbiology*, v. 13, p. 906724, 2022. DOI:

<http://doi.org/10.3389/fmicb.2022.906724>

ANAND, U.; PAL, T.; YADAV, N.; SINGH, V. K.; TRIPATHI, V.; CHOUDHARY, K. K.;

SINGH, A. K. Current scenario and future prospects of endophytic microbes: promising candidates for abiotic and biotic stress management for agricultural and environmental sustainability. *Microbial ecology*, v. 86, n. 3, p. 1455-1486, 2023. DOI:

<http://doi.org/10.1007/s00248-023-02190-1>

AIZEN, M. A.; TORRES, A. The invasion ecology of mutualism. *Annual Review of Ecology,*

Evolution, and Systematics, v. 55, 2024. DOI: [http://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-](http://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-102622-031210)

102622-031210

AMEEN, M.; MAHMOOD, A.; SAHKOOR, A.; ZIA, M. A.; ULLAH, M. S. The role of endophytes to combat abiotic stress in plants. *Plant Stress*, p. 100435, 2024. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.stress.2024.100435>

ASGHARI, S.; HARIGHI, B.; ASHENGROPH, M.; CLEMENT, C.; AZIZ, A.; ESMAEEL, Q.; AIT BARKA, E. Induction of systemic resistance to *Agrobacterium tumefaciens* by endophytic bacteria in grapevine. *Plant Pathology*, v. 69, n. 5, p. 827-837, 2020. DOI: <http://doi.org/10.1111/ppa.13175>

BACKMAN, P. A.; SIKORA, R. A. Endophytes: an emerging tool for biological control. *Biological control*, v. 46, n. 1, p. 1-3, 2008. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2008.03.009>

BALLESTEROS, G. I.; NEWSHAM, K. K.; ACUÑA-RODRÍGUEZ, I. S.; ATALA, C.; TORRES-DÍAZ, C.; MOLINA-MONTENEGRO, M. A. Extreme environments as sources of fungal endophytes mitigating climate change impacts on crops in Mediterranean-type ecosystems. *Plants, People, Planet*, v. 6, n. 1, p. 148-161, 2024. DOI: <http://doi.org/10.1002/ppp3.10415>

BARD, N. W.; CRONK, Q. C. B.; DAVIES, T. J. Fungal endophytes can modulate plant invasion. *Biological Reviews*, v. 99, n. 5, p. 1652-1671, 2024. DOI: <http://doi.org/10.1111/brv.13085>

BARY, A. Morphologie und physiologie der pilze, flechten und myxomyceten. Engelmann, 1866.

BATHKE, K. J.; JOCHUM, C. C.; YUEN, G. Y. Biological control of bacterial leaf streak of corn using systemic resistance-inducing *Bacillus* strains. *Crop Protection*, v. 155, p. 105932, 2022. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.cropro.2022.105932>

BHARDWAJ, M.; KAILOO, S.; KHAN, R. T.; KHAN, S. S.; RASOOL, S. Harnessing fungal endophytes for natural management: a biocontrol perspective. *Frontiers in Microbiology*, v. 14, p. 1280258, 2023. DOI: <http://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1280258>

BITLA, U. M.; SORTY, A. M.; MEENA, K. K.; SINGH, N. P. Rhizosphere signaling cascades: fundamentals and determinants. In: *Plant-Microbe Interactions in Agro-Ecological Perspectives: Volume 1: Fundamental Mechanisms, Methods and Functions*. Singapore: Springer Singapore, 2017. p. 211-226. DOI: http://doi.org/doi.org/10.1007/978-981-10-5813-4_11

BODHANKAR, S.; GROVER, M.; HEMANTH, S.; REDDY, G.; RASUL, S.; YADAV, S. K.; SRINIVASARAO, C. Maize seed endophytic bacteria: dominance of antagonistic, lytic enzyme-producing *Bacillus* spp. *3 Biotech*, v. 7, n. 4, p. 232, 2017. DOI: <http://doi.org/10.1007/s13205-017-0860-0>

BRASIL. Lei no 15.070, de 23 de dezembro de 2024. [S. l.], 2024c. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/115070.htm. Acesso em: 21 abr. 2025.

BRUNELLE, T.; CHAKIR, R.; CARPENTIER, A.; DORIN, B.; GOLL, D.; GUILPART, N.; TANG, F. H. Reducing chemical inputs in agriculture requires a system change.

Communications Earth & Environment, v. 5, n. 1, p. 369, 2024. DOI: <http://doi.org/10.1038/s43247-024-01533-1>

BULLOR, L.; BRAUDE, H.; MONZÓN, J.; PRADO, A. M. C.; CASAVOLA, V.; MORÓN, N. C.; RISOPOULOS, J. Bioinputs: investment opportunities in Latin America. Food & Agriculture Org.[Author], 2024. DOI: <http://doi.org/10.1038/s43247-024-01533-1>

BURRAGONI, S. G.; JEON, J. Applications of endophytic microbes in agriculture, biotechnology, medicine, and beyond. *Microbiological research*, v. 245, p. 126691, 2021. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126691>

BHUTANI, N.; MAHESHWARI, R.; KUMAR, P.; SUNEJA, P. Bioprospecting of endophytic bacteria from nodules and roots of *Vigna radiata*, *Vigna unguiculata* and *Cajanus cajan* for their potential use as bioinoculants. *Plant Gene*, v. 28, p. 100326, 2021. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.plgene.2021.100326>

CHAKRABORTY, A.; AMRIT, R.; DUTTA, P.; OSBORNE, W. J. Unlocking Nature's Vault: Endophytes as Plant-Sourced Biological Treasures. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, p. 103685, 2025. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.bcab.2025.103685>

CHAUDHARY, P.; AGRI, U.; CHAUDHARY, A.; KUMAR, A.; KUMAR, G. Endophytes and their potential in biotic stress management and crop production. *Frontiers in microbiology*, v. 13, p. 933017, 2022. DOI: <http://doi.org/10.3389/fmicb.2022.933017>

CHAUDHARY, P.; SINGH, S.; CHAUDHARY, A.; SHARMA, A.; KUMAR, G. Overview of biofertilizers in crop production and stress management for sustainable agriculture. *Frontiers in Plant Science*, v. 13, p. 930340, 2022. DOI: <http://doi.org/10.3389/fpls.2022.930340>

CHENG, Y. T.; ZHANG, L.; HE, S. Y. Plant-microbe interactions facing environmental challenge. *Cell host & microbe*, v. 26, n. 2, p. 183-192, 2019. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.chom.2019.07.009>

CHO, H. S.; PARK, S. Y.; RYU, C. M.; KIM, J. F.; KIM, J. G.; PARK, S. H. Interference of quorum sensing and virulence of the rice pathogen *Burkholderia glumae* by an engineered endophytic bacterium. *FEMS microbiology ecology*, v. 60, n. 1, p. 14-23, 2007. DOI: <http://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2007.00280.x>

COMPANT, S.; SAIKKONEN, K.; MITTER, B.; CAMPISANO, A.; MERCADO-BLANCO, J. Editorial special issue: soil, plants and endophytes. *Plant and Soil*, v. 405, n. 1, p. 1-11, 2016. DOI: <http://doi.org/10.1007/s11104-016-2927-9>

CUI, J.; NIE, F.; ZHAO, Y.; ZHANG, D.; ZHOU, D.; WU, J.; LIU, L. A review on plant endophytes in response to abiotic stress. *Environmental Pollutants and Bioavailability*, v. 36, n. 1, p. 2323123, 2024. DOI: <http://doi.org/10.1080/26395940.2024.2323123>

CUI, K.; XU, T.; CHEN, J.; YANG, H.; LIU, X.; ZHUO, R.; ZHU, Y. Siderophores, a potential phosphate solubilizer from the endophyte *Streptomyces* sp. CoT10, improved phosphorus mobilization for host plant growth and rhizosphere modulation. *Journal of cleaner production*, v. 367, p. 133110, 2022. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133110>

DAS, D.; SHARMA, P. L.; PAUL, P.; BARUAH, N. R.; CHOUDHURY, J.; BEGUM, T.; KALITA, J. Harnessing endophytes: innovative strategies for sustainable agricultural practices. *Discover Bacteria*, v. 2, n. 1, p. 1, 2025. DOI: <http://doi.org/10.1007/s44351-025-00011-z>

DING, T.; SU, B.; CHEN, X.; XIE, S.; GU, S.; WANG, Q.; JIANG, H. An endophytic bacterial strain isolated from *Eucommia ulmoides* inhibits southern corn leaf blight. *Frontiers in Microbiology*, v. 8, p. 903, 2017. DOI: <http://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00903>

DISSANAYAKE, A. J.; PURAHONG, W.; WUBET, T.; HYDE, K. D.; ZHANG, W.; XU, H.; YAN, J. Direct comparison of culture-dependent and culture-independent molecular approaches reveal the diversity of fungal endophytic communities in stems of grapevine (*Vitis vinifera*). *Fungal Diversity*, v. 90, n. 1, p. 85-107, 2018. DOI: <http://doi.org/10.1007/s13225-018-0399-3>

DLAMINI, W. N.; LAI, W. A.; CHEN, W. C.; SHEN, F. T. Unveiling the Thermotolerance and Growth-Promoting Attributes of Endophytic Bacteria Derived from *Oryza sativa*:

Implications for Sustainable Agriculture. *Microorganisms*, v. 13, n. 4, p. 766, 2025. DOI: <http://doi.org/10.3390/microorganisms13040766>

DUQUE, T. S.; PINHEIRO, R. A.; SOUZA, I. M.; SILVA, G. G.; SOARES, M. A.; SANTOS, J. B. Herbicides and bio-inputs: Compatibility and challenges for sustainable agriculture. *Chemosphere*, v. 369, p. 143878, 2024. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143878>

ELIAS, F.; WOYESSA, D.; MULETA, D. Phosphate solubilization potential of rhizosphere fungi isolated from plants in Jimma Zone, Southwest Ethiopia. *International Journal of Microbiology*, v. 2016, n. 1, p. 5472601, 2016. DOI: <http://doi.org/10.1155/2016/5472601>

ERCOLE, T. G.; BONOTTO, D. R.; HUNGRIA, M.; KAVA, V. M.; GALLI, L. V. The role of endophytic bacteria in enhancing plant growth and health for sustainable agriculture. *Antonie van Leeuwenhoek*, v. 118, n. 7, p. 88, 2025. DOI: <http://doi.org/doi.org/10.1007/s10482-025-02100-0>

FRANCO, M. H. R.; BELAN, H. C.; MAIA, J. E. S.; MOTA, R. P. D., FERRAZ-ALMEIDA, R.; CAMARGO, R.; LEMES, E. M. *Bacillus*-inoculated organomineral fertilizer in soybean crop during short-term: comparing sources and doses with mineral fertilizer. *Journal of Plant Nutrition*, v. 48, n. 7, p. 1083-1097, 2025. DOI: <http://doi.org/10.1080/01904167.2024.2422072>

GAMA, R. C. N.; CASTRO, J. S.; MARANGON, B. B.; JESUS JUNIOR, M. M.; RIBEIRO, V. J.; SILVA, J.; CALIJURI, M. L. Microalgae bioinputs as disruptive technology for a sustainable agriculture: a systematic and bibliometric review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, p. 116034, 2025. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jece.2025.116034>

GHOSH, S.; DAS, S. Impact of climate change on microbial endophytes: novel nanoscale cell factories. In: *Microbiome Under Changing Climate*. Woodhead Publishing, 2022. p. 161-185. DOI: <http://doi.org/10.1016/B978-0-323-90571-8.00007-9>

GUO, K.; YANG, J.; YU, N.; LUO, L.; WANG, E. Biological nitrogen fixation in cereal crops: Progress, strategies, and perspectives. *Plant Communications*, v. 4, n. 2, 2023. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.xplc.2022.100499>

GUPTA, G.; PANWAR, J.; AKHTAR, M. S.; JHA, P. N. Endophytic nitrogen-fixing bacteria as biofertilizer. In: *Sustainable Agriculture Reviews: Volume 11*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2012. p. 183-221. DOI: http://doi.org/10.1007/978-94-007-5449-2_8

GURUNG, S. A.; RAI, A. K.; SUNAR, K.; DAS, K. Plant–Endophyte Interactions: a driving phenomenon for boosting plant health under climate change conditions. In: *Microbial symbionts and plant health: trends and applications for changing climate*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023. p. 233-263. DOI: http://doi.org/10.1007/978-981-99-0030-5_10

HARDOIM, P. R.; VAN OVERBEEK, L. S.; VAN ELSAS, J. D. Properties of bacterial endophytes and their proposed role in plant growth. *Trends in microbiology*, v. 16, n. 10, p. 463-471, 2008. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.tim.2008.07.008>

HARDOIM, P. R.; VAN OVERBEEK, L. S.; BERG, G.; PIRTILÄ, A. M.; COMPANT, S.; CAMPISANO, A.; SESSITSCH, A. The hidden world within plants: ecological and evolutionary considerations for defining functioning of microbial endophytes. *Microbiology and molecular biology reviews*, v. 79, n. 3, p. 293-320, 2015. DOI: <http://doi.org/10.1128/membr.00050-14>

HASSAN, S. E. Plant growth-promoting activities for bacterial and fungal endophytes isolated from medicinal plant of *Teucrium polium* L. *Journal of advanced research*, v. 8, n. 6, p. 687-695, 2017. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jare.2017.09.001>

HUNG, S. H. W.; HUANG, T. C.; LAI, Y. C.; WU, I. C.; LIU, C. H.; HUANG, Y. F.; HUANG, C. C. Endophytic biostimulants for smart agriculture: *Burkholderia seminalis* 869T2 benefits heading leafy vegetables in-field management in Taiwan. *Agronomy*, v. 13, n. 4, p. 967, 2023. DOI: <http://doi.org/10.3390/agronomy13040967>

JACOB, J.; KRISHNAN, G. V.; THANKAPPAN, D.; AMMA, D. K. B. N. S. Endophytic bacterial strains induced systemic resistance in agriculturally important crop plants. In: *Microbial endophytes*. Woodhead Publishing, 2020. p. 75-105. DOI: <http://doi.org/10.1016/B978-0-12-819654-0.00004-1>

JHA, P.; PANWAR, J.; JHA, P. N. Mechanistic insights on plant root colonization by bacterial endophytes: a symbiotic relationship for sustainable agriculture. *Environmental Sustainability*, v. 1, n. 1, p. 25-38, 2018. DOI: <http://doi.org/10.1007/s42398-018-0011-5>

JIANG, Y.; YUE, Y.; WANG, Z.; LU, C.; YIN, Z.; LI, Y.; DING, X. Plant biostimulant as an environmentally friendly alternative to modern agriculture. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v. 72, n. 10, p. 5107-5121, 2024. DOI: <http://doi.org/10.1021/acs.jafc.3c09074>

JL, X.; XIA, Y.; ZHANG, H.; CUI, J. L. The microscopic mechanism between endophytic fungi and host plants: From recognition to building stable mutually beneficial relationships. *Microbiological Research*, v. 261, p. 127056, 2022. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.micres.2022.127056>

JOO, H.; DEYRUP, S. T.; SHIM, S. H. Endophyte-produced antimicrobials: a review of potential lead compounds with a focus on quorum-sensing disruptors. *Phytochemistry Reviews*, v. 20, n. 3, p. 543-568, 2021. DOI: <http://doi.org/10.1007/s11101-020-09711-7>

KAMATH, A.; SHUKLA, A.; SAIYED, T.; BHATT, S.; RATHOD, H.; MAKWANA, V.; PATEL, D. Bioinoculants: the agrarian avengers. *Symbiosis*, v. 91, n. 1, p. 151-166, 2023. DOI: <http://doi.org/10.1007/s13199-023-00953-5>

KAMATH, A.; SHUKLA, A.; PATEL, D. Quorum Sensing and Quorum Quenching: Two sides of the same coin. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, v. 123, p. 101927, 2023. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.pmpp.2022.101927>

KANDEL, S. L.; JOUBERT, P. M.; DOTY, S. L. Bacterial endophyte colonization and distribution within plants. *Microorganisms*, v. 5, n. 4, p. 77, 2017. DOI: <http://doi.org/10.3390/microorganisms5040077>

KAUR, R.; SAXENA, S. Evaluation of drought-tolerant endophytic fungus *Talaromyces purpureogenus* as a bioinoculant for wheat seedlings under normal and drought-stressed circumstances. *Folia microbiologica*, v. 68, n. 5, p. 781-799, 2023. DOI: <http://doi.org/10.1007/s12223-023-01051-1>

KHOURY, C. A. Can colonization by an endophytic fungus transform a plant into a challenging host for insect herbivores?. *Fungal Biology*, v. 125, n. 12, p. 1009-1016, 2021. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.funbio.2021.08.001>

KIAROOD, S. L. A.; RAHNAMA, K.; GOLMOHAMMADI, M.; NASROLLANEJAD, S. Quorum-quenching endophytic bacteria inhibit disease caused by *Pseudomonas syringae* pv. *syringae* in Citrus cultivars. *Journal of Basic Microbiology*, v. 60, n. 9, p. 746-757, 2020. DOI: <http://https://doi.org/10.1002/jobm.202000038>

KNIGHTS, H. E.; JORRIN, B.; HASKETT, T. L.; POOLE, P. S. Deciphering bacterial mechanisms of root colonization. *Environmental Microbiology Reports*, v. 13, n. 4, p. 428-444, 2021. DOI: <http://doi.org/10.1111/1758-2229.12934>

KOGEL, K.; FRANKEN, P.; HÜCKELHOVEN, R. Endophyte or parasite—what decides?.

Current opinion in plant biology, v. 9, n. 4, p. 358-363, 2006. DOI:

<http://doi.org/10.1016/j.pbi.2006.05.001>

KUMAR, A.; SAHARAN, B. S.; PARSHAD, J.; GERA, R.; CHOUDHARY, J.; YADAV, R.

Revolutionizing Indian agriculture: the imperative of advanced biofertilizer technologies for sustainability. *Discover Agriculture*, v. 2, n. 1, p. 24, 2024. DOI:

<http://doi.org/10.1007/s44279-024-00037-y>

KUMAR, P.; SINGH, J. Harnessing Bioproducts for a Sustainable Circular Economy. In:

Value Addition and Utilization of Lignocellulosic Biomass: Through Novel Technological Interventions. Singapore: Springer Nature Singapore, 2025. p. 263-293. DOI:

http://doi.org/10.1007/978-981-96-2786-8_11

KUŻNIAR, A.; KRUCZYŃSKA, A.; WŁODARCZYK, K.; VANGRONSVELD, J.;

WOLIŃSKA, A. Endophytes as Permanent or Temporal Inhabitants of Different Ecological Niches in Sustainable Agriculture. *Applied Sciences*, v. 15, n. 3, p. 1253, 2025. DOI:

<http://doi.org/10.3390/app15031253>

LACAVAL, P. T.; AZEVEDO, J. L. Biological control of insect-pest and diseases by

endophytes. In: *Advances in endophytic research*. New Delhi: Springer India, 2013. p. 231-256. DOI: http://doi.org/10.1007/978-81-322-1575-2_13

LACAVAL, P. T.; MACHADO, P. C.; ANDRADE, P. H. M. Phosphate solubilization by

endophytes from the tropical plants. In: *Endophytes: Mineral Nutrient Management, Volume*

3. Cham: Springer International Publishing, 2021. p. 207-226. DOI:

http://doi.org/10.1007/978-3-030-65447-4_9

LI, Q.; LIN, F.; SU, Z. Endophytic fungi—Big player in plant-microbe symbiosis. *Current Plant Biology*, p. 100481, 2025. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.cpb.2025.100481>

MISHRA, S.; BHATTACHARJEE, A.; SHARMA, S. An ecological insight into the multifaceted world of plant-endophyte association. *Critical Reviews in Plant Sciences*, v. 40, n. 2, p. 127-146, 2021. DOI: <http://doi.org/10.1080/07352689.2021.1901044>

LIU, H.; CARVALHAIS, L. C.; CRAWFORD, M.; SINGH, E.; DENNIS, P. G.; PIETERSE, C. M.; SCHENK, P. M. Inner plant values: diversity, colonization and benefits from endophytic bacteria. *Frontiers in microbiology*, v. 8, p. 2552, 2017. DOI: <http://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02552>

LU, H.; WEI, T.; LOU, H.; SHU, X.; CHEN, Q. A critical review on communication mechanism within plant-endophytic fungi interactions to cope with biotic and abiotic stresses. *Journal of Fungi*, v. 7, n. 9, p. 719, 2021. DOI: <http://doi.org/10.3390/jof7090719>

MAITRA, S.; BRESTIC, M.; BHADRA, P.; SHANKAR, T.; PRAHARAJ, S.; PALAI, J. B.; HOSSAIN, A. Bioinoculants—natural biological resources for sustainable plant production. *Microorganisms*, v. 10, n. 1, p. 51, 2021. DOI: <http://doi.org/10.3390/microorganisms10010051>

MAJHI, P.; PRADHAN, U.; TOPPO, A.; SHUKLA, A. K. Fungal Endophytes: An Insight into Diversity, Stress Tolerance, Biocontrol and Plant Growth-Promoting Potentials. *Current Microbiology*, v. 82, n. 6, p. 283, 2025. DOI: <http://doi.org/10.1007/s00284-025-04266-2>

MANTZOUKAS, S.; PAPANTZIKOS, V.; KATSOGIANNOU, S.; PAPANIKOU, A.; KOUKIDIS, C.; SERVIS, D.; PATAKIOUTAS, G. Biostimulant and bioinsecticidal effect of coating cotton seeds with endophytic *Beauveria bassiana* in semi-field conditions. *Microorganisms*, v. 11, n. 8, p. 2050, 2023. DOI: <http://doi.org/10.3390/microorganisms11082050>

MENGISTU, A. A. Endophytes: colonization, behaviour, and their role in defense mechanism. *International Journal of Microbiology*, v. 2020, n. 1, p. 6927219, 2020. DOI: <http://doi.org/10.1155/2020/6927219>

MOHITE, B. V.; KOLI, S. H.; BORASE, H. P.; RAJPUT, J. D.; NARKHEDE, C. P.; PATIL, V. S.; PATIL, S. V. New age agricultural bioinputs. *Microbial Interventions in Agriculture and Environment: Volume 1: Research Trends, Priorities and Prospects*, p. 353-380, 2019. DOI: http://doi.org/10.1007/978-981-13-8391-5_14

MOWAFY, A. M.; FAWZY, M. M.; GEBREIL, A.; ELSAYED, A. Endophytic *Bacillus*, *Enterobacter*, and *Klebsiella* enhance the growth and yield of maize. *Acta Agriculturae Scandinavica*, v. 71, n. 4, p. 237-246, 2021. DOI: <http://doi.org/10.1080/09064710.2021.1880621>

MUHAMMAD, M.; WAHAB, A.; WAHEED, A.; MOHAMED, H. I.; HAKEEM, K. R.; LI, L.; LI, W. J. Harnessing bacterial endophytes for environmental resilience and agricultural sustainability. *Journal of Environmental Management*, v. 368, p. 122201, 2024. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122201>

NIMBULKAR, P.; GUPTA, G.; VIRKHARE, U.; ALTHUBIANI, A. S.; DUTTA, A.; KHER, D. Bacterial endophytes and their secondary metabolites: mechanisms of biosynthesis and applications in sustainable agriculture. *Journal of Umm Al-Qura University for Applied Sciences*, p. 1-13, 2025. DOI: <http://doi.org/10.1007/s43994-025-00233-6>

NIU, H.; SUN, Y.; ZHANG, Z.; ZHAO, D.; WANG, N.; WANG, L.; GUO, H. The endophytic bacterial entomopathogen *Serratia marcescens* promotes plant growth and improves resistance against *Nilaparvata lugens* in rice. *Microbiological Research*, v. 256, p. 126956, 2022. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.micres.2021.126956>

NUNES, P. S.; LACERDA-JUNIOR, G. V.; MASCARIN, G. M.; GUIMARÃES, R. A.; MEDEIROS, F. H.; ARTHURS, S.; BETTIOL, W. Microbial consortia of biological products: do they have a future?. *Biological Control*, v. 188, p. 105439, 2024. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2024.105439>

OROZCO-MOSQUEDA, M. C.; SANTOYO, G. Plant-microbial endophytes interactions: scrutinizing their beneficial mechanisms from genomic explorations. *Current Plant Biology*, v. 25, p. 100189, 2021. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.cpb.2020.100189>

PANDEY, S. S.; JAIN, R.; BHARDWAJ, P.; THAKUR, A.; KUMARI, M.; BHUSHAN, S.; KUMAR, S. Plant probiotics–endophytes pivotal to plant health. *Microbiological Research*, v. 263, p. 127148, 2022. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.micres.2022.127148>

PANG, F.; TAO, A.; AYRA-PARDO, C.; WANG, T.; YU, Z.; HUANG, S. Plant organ-and growth stage-diversity of endophytic bacteria with potential as biofertilisers isolated from wheat (*Triticum aestivum* L.). *BMC Plant Biology*, v. 22, n. 1, p. 276, 2022. DOI: <http://doi.org/10.1186/s12870-022-03615-8>

PATHAK, P.; RAI, V. K.; CAN, H.; SINGH, S. K.; KUMAR, D.; BHARDWAJ, N.; KUMAR, A. Plant-endophyte interaction during biotic stress management. *Plants*, v. 11, n. 17, p. 2203, 2022. DOI: <http://doi.org/10.3390/plants11172203>

PAUL, E.; MATHUR, P.; SHARMA, C.; CHATURVEDI, P. Quorum quenching strategies of endophytic bacteria: Role in plant protection. In: *Plant-microbe interaction-Recent advances in molecular and biochemical approaches*. Academic Press, 2023. p. 149-166. DOI: <http://doi.org/10.1016/B978-0-323-91876-3.00005-1>

PEREIRA, F.; PEREIRA, A.; MENEZES, L. D.; SAWAIKAR, R. *Rhizobium* as a biofertilizer for non-leguminous plants. *Discover Food*, v. 4, n. 1, p. 85, 2024. DOI: <http://doi.org/10.1007/s44187-024-00167-8>

PIRTTILÄ, A. M.; BRUSILA, V.; KOSKIMÄKI, J. J.; WÄLI, P. R.; RUOTSALAINEN, A. L.; MUTANEN, M.; MARKKOLA, A. M. Exchange of microbiomes in plant-insect

herbivore interactions. *Mbio*, v. 14, n. 2, p. e03210-22, 2023. DOI:

<http://doi.org/10.1128/mbio.03210-22>

POLA, S.; KESHARWANI, A. K.; SINGH, J.; SINGH, D.; KALIA, V. K. Endophytic ability of indigenous *Bacillus thuringiensis* strain VKK-BB2: new horizons for the development of novel insect pest-resistant crops. *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, v. 32, n. 1, p. 1-12, 2022. DOI: <http://doi.org/10.1186/s41938-022-00512-y>

RABBEE, M. F.; ALI, M. S.; ISLAM, M. N.; RAHMAN, M. M.; HASAN, M. M.; BAEK, K. H. Endophyte mediated biocontrol mechanisms of phytopathogens in agriculture. *Research in Microbiology*, v. 175, n. 8, p. 104229, 2024. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.resmic.2024.104229>

RICCI, M.; TILBURY, L.; DARIDON, B.; SUKALAC, K. General principles to justify plant biostimulant claims. *Frontiers in plant science*, v. 10, p. 494, 2019. DOI: <http://doi.org/10.3389/fpls.2019.00494>

REIS, J. B. A.; LORENZI, A. S.; VALE, H. M. M. Methods used for the study of endophytic fungi: a review on methodologies and challenges, and associated tips. *Archives of Microbiology*, v. 204, n. 11, p. 675, 2022. DOI: <http://doi.org/10.1007/s00203-022-03283-0>

ROCHA, T. M.; MARCELINO, P. R. F.; COSTA, R. A. M.; RUBIO-RIBEAUX, D.; BARBOSA, F. G.; SILVA, S. S. Agricultural bioinputs obtained by solid-state fermentation: From production in biorefineries to sustainable agriculture. *Sustainability*, v. 16, n. 3, p. 1076, 2024. DOI: <http://doi.org/10.3390/su16031076>

RODRIGUEZ, R. J.; WHITE JR, J. F.; ARNOLD, A. E.; REDMAN, A. R. A. Fungal endophytes: diversity and functional roles. *New phytologist*, v. 182, n. 2, p. 314-330, 2009. DOI: <http://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2009.02773.x>

ROMERALO, C.; SANTAMARÍA, O.; PANDO, V.; DIEZ, J. J. Fungal endophytes reduce necrosis length produced by *Gremmeniella abietina* in *Pinus halepensis* seedlings. *Biological Control*, v. 80, p. 30-39, 2015. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2014.09.010>

RUMYANTSEV, S. D.; VESELOVA, S. V.; BURKHANOVA, G. F.; ALEKSEEV, V. Y.; MAKSIMOV, I. V. *Bacillus subtilis* 26D triggers induced systemic resistance against *Rhopalosiphum padi* L. by regulating the expression of genes AGO, DCL and microRNA in bread spring wheat. *Microorganisms*, v. 11, n. 12, p. 2983, 2023. DOI: <http://doi.org/10.3390/microorganisms11122983>

SAIA, S.; CORRADO, G.; VITAGLIONE, P.; COLLA, G.; BONINI, P.; GIORDANO, M.; ROUPHAEL, Y. An endophytic fungi-based biostimulant modulates volatile and non-volatile secondary metabolites and yield of greenhouse basil (*Ocimum basilicum* L.) through variable mechanisms dependent on salinity stress level. *Pathogens*, v. 10, n. 7, p. 797, 2021. DOI: <http://doi.org/10.3390/pathogens10070797>

SALLAM, N.; ALI, E. F.; SELEIM, M. A.; KHALIL BAGY, H. M. Endophytic fungi associated with soybean plants and their antagonistic activity against *Rhizoctonia solani*. *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, v. 31, n. 1, p. 54, 2021. DOI: <http://doi.org/10.1186/s41938-021-00402-9>

SANTOS, M. L. D.; BERLITZ, D. L.; WIEST, S. L. F.; SCHÜNEMANN, R.; KNAACK, N.; FIUZA, L. M. Benefits associated with the interaction of endophytic bacteria and plants. *Brazilian archives of biology and technology*, v. 61, p. e18160431, 2018. DOI: <http://doi.org/10.1590/1678-4324-2018160431>

SEEMA, N.; HAMAYUN, M.; HUSSAIN, A.; SHAH, M.; IRSHAD, M.; QADIR, M.; ALI, S. Endophytic *Fusarium proliferatum* reprogrammed phytohormone production and antioxidant system of *Oryza sativa* under drought stress. *Agronomy*, v. 13, n. 3, p. 873, 2023. DOI: <http://doi.org/10.3390/agronomy13030873>

SENA, L.; MICA, E.; VALÈ, G.; VACCINO, P.; PECCHIONI, N. Exploring the potential of endophyte-plant interactions for improving crop sustainable yields in a changing climate. *Frontiers in Plant Science*, v. 15, p. 1349401, 2024. DOI: <http://doi.org/10.3389/fpls.2024.1349401>

SHEN, F. T.; YEN, J. H.; LIAO, C. S.; CHEN, W. C.; CHAO, Y. T. Screening of rice endophytic biofertilizers with fungicide tolerance and plant growth-promoting characteristics. *Sustainability*, v. 11, n. 4, p. 1133, 2019. DOI: <http://doi.org/10.3390/su11041133>

SILVA, H. S.; TOZZI, J. P.; TERRASAN, C. R.; BETTIOL, W. Endophytic microorganisms from coffee tissues as plant growth promoters and biocontrol agents of coffee leaf rust. *Biological Control*, v. 63, n. 1, p. 62-67, 2012. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2012.06.005>

SILVA, L. I.; PEREIRA, M. C.; CARVALHO, A. M. X.; BUTTROS, V. H.; PASQUAL, M.; DORIA, J. Phosphorus-solubilizing microorganisms: a key to sustainable agriculture.

Agriculture, v. 13, n. 2, p. 462, 2023. DOI: <http://doi.org/10.3390/agriculture13020462>

SINGH, R.; KUMAR, M.; MITTAL, A.; MEHTA, P. K. Microbial metabolites in nutrition, healthcare and agriculture. *3 Biotech*, v. 7, n. 1, p. 15, 2017. DOI:

<http://doi.org/10.1007/s13205-016-0586-4>

SOROKAN, A., VESELOVA, S., BENKOVSKAYA, G., & MAKSIMOV, I. Endophytic strain *Bacillus subtilis* 26D increases levels of phytohormones and repairs growth of potato plants after colorado potato beetle damage. *Plants*, v. 10, n. 5, p. 923, 2021. DOI:

<http://doi.org/10.3390/plants10050923>

SPAGNOLETTI, F. N.; CHIOCCHIO, V. M. Tolerance of dark septate endophytic fungi (DSE) to agrochemicals in vitro. *Revista Argentina de Microbiología*, v. 52, n. 1, p. 43-49, 2020. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.ram.2019.02.003>

SUN, X.; GUO, L. Endophytic fungal diversity: review of traditional and molecular techniques. *Mycology*, v. 3, n. 1, p. 65-76, 2012. DOI:

<http://doi.org/10.1080/21501203.2012.656724>

SUN, J.; YANG, X. Q.; WAN, J. L.; HAN, H. L.; ZHAO, Y. D.; CAI, L.; DING, Z. T. The antifungal metabolites isolated from maize endophytic fungus *Fusarium* sp. induced by OSMAC strategy. *Fitoterapia*, v. 171, p. 105710, 2023. DOI:

<http://doi.org/10.1016/j.fitote.2023.105710>

SURYANARAYANAN, T. S. Endophytes and weed management: a commentary. *Plant Physiology Reports*, v. 24, n. 4, p. 576-579, 2019. DOI: <http://doi.org/10.1007/s40502-019-00488-2>

TANG, M. J.; LU, F.; YANG, Y.; SUN, K.; ZHU, Q.; XU, F. J.; DAI, C. C. Benefits of endophytic fungus *Phomopsis liquidambaris* inoculation for improving mineral nutrition, quality, and yield of rice grains under low nitrogen and phosphorus condition. *Journal of Plant Growth Regulation*, v. 41, n. 6, p. 2499-2513, 2022. DOI: <http://doi.org/10.1007/s00344-021-10462-8>

TAHERI, E.; TARIGHI, S.; TAHERI, P. An endophytic bacterium with biocontrol activity against important wheat pathogens. *Biological Control*, v. 183, p. 105243, 2023. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2023.105243>

TIWARI, P.; KANG, S.; BAE, H. Plant-endophyte associations: Rich yet under-explored sources of novel bioactive molecules and applications. *Microbiological Research*, v. 266, p. 127241, 2023. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.micres.2022.127241>

YADAV, G.; SRIVASTVA, R.; GUPTA, P. Endophytes and their applications as biofertilizers. In: *Microbial Technology for Sustainable Environment*. Singapore: Springer Singapore, 2021. p. 95-123. DOI: http://doi.org/10.1007/978-981-16-3840-4_7

YAN, L.; ZHU, J.; ZHAO, X.; SHI, J.; JIANG, C.; SHAO, D. Beneficial effects of endophytic fungi colonization on plants. *Applied microbiology and biotechnology*, v. 103, n. 8, p. 3327-3340, 2019. DOI: <http://doi.org/10.1007/s00253-019-09713-2>

YANG, Y.; TILMAN, D.; JIN, Z.; SMITH, P.; BARRETT, C. B.; ZHU, Y. G.; ZHUANG, M. Climate change exacerbates the environmental impacts of agriculture. *Science*, v. 385, n. 6713, p. eadn3747, 2024. DOI: <http://doi.org/10.1126/science.adn3747>

XU, X.; DINESEN, C.; PIOPPI, A.; KOVÁCS, Á. T.; LOZANO-ANDRADE, C. N. Composing a microbial symphony: synthetic communities for promoting plant growth. *Trends in Microbiology*, 2025. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.tim.2025.01.006>

WANI, Z. A.; ASHRAF, N.; MOHIUDDIN, T.; RIYAZ-UL-HASSAN, S. Plant-endophyte symbiosis, an ecological perspective. *Applied microbiology and biotechnology*, v. 99, n. 7, p. 2955-2965, 2015. DOI: <http://doi.org/10.1007/s00253-015-6487-3>

WATTS, D.; PALOMBO, E. A.; JAIMES CASTILLO, A.; ZAFERANLOO, B. Endophytes in agriculture: potential to improve yields and tolerances of agricultural crops. *Microorganisms*, v. 11, n. 5, p. 1276, 2023. DOI: <http://doi.org/10.3390/microorganisms11051276>

WHITE, J. F.; KINGSLEY, K. L.; ZHANG, Q.; VERMA, R.; OBI, N.; DVINSKIKH, S.; KOWALSKI, K. P. Endophytic microbes and their potential applications in crop management. *Pest Management Science*, v. 75, n. 10, p. 2558-2565, 2019. DOI: <http://doi.org/10.1002/ps.5527>

ZENG, Q.; DONG, J.; LIN, X.; ZHOU, X.; XU, H. Isolation and identification of *Acer truncatum* Endophytic Fungus *Talaromyces verruculosus* and evaluation of its effects on insoluble phosphorus absorption capacity and growth of *Cucumber* seedlings. *Journal of Fungi*, v. 10, n. 2, p. 136, 2024. DOI: <http://doi.org/10.3390/jof10020136>

ZHAO, C.; ONYINO, J.; GAO, X. Current advances in the functional diversity and mechanisms underlying endophyte–plant interactions. *Microorganisms*, v. 12, n. 4, p. 779, 2024. DOI: <http://10.3390/microorganisms12040779>

CONCLUSÃO GERAL

Os microrganismos endofíticos são uma alternativa promissora para o desenvolvimento de práticas agrícolas economicamente e ecologicamente sustentáveis e eficientes. A capacidade destes microrganismos de colonizar os tecidos vegetais de forma não patogênica, estabelecendo interações mutualísticas que promovem o crescimento vegetal, melhoram a absorção de nutrientes, aumentam a tolerância a estresses abióticos e a dependência de insumo químicos. Ademais, os endofíticos têm potencial para o biocontrole de pragas e fitopatógenos, reduzindo a incidência de doenças e aumentando a resiliência dos sistemas agrícolas.

Contudo, a utilização em larga escala dos endofíticos ainda enfrenta desafios, como a compreensão dos mecanismos moleculares que regulam a interação planta-endofítico, a diversidade de respostas entre as espécies vegetais e a necessidade de protocolos padronizados para o desenvolvimento de formulações para aplicação dos endofíticos ou seus metabólitos secundários e moléculas sinalizadoras como insumos. Assim, novos avanços demandarão a integração entre pesquisa, políticas de incentivo à inovação em biotecnologia e à transferência de tecnologia para o campo.

Os endofíticos apresentam-se como ferramentas biotecnológicas de alto valor para transição rumo a sistemas agrícolas de baixo impacto ambiental, capazes de garantir a produção sustentável de alimentos.