CAPÍTULO 3

POTENCIAL DOS BIOINSUMOS NO CONTROLE BIOLÓGICO DE FITOPATÓGENOS AGRÍCOLAS: DO MODO DE AÇÃO ÀS NOVAS ESTRATÉGIAS DE MANEJO

DOI DO CAPÍTULO: 10.29327/5963730.1-3

Jozadake Petry Fausto, e-mail: jozadakepetryfausto@gmail.com, URL lattes: http://lattes.cnpq.br/3339996527225371
William Acioly de Gouveia, e-mail: william.gouveia@ceca.ufal.br, URL lattes: http://lattes.cnpq.br/4335981219213690
Moisés Silva de mendonça Júnior, e-mail: moises.agro2025@gmail.com, URL lattes: https://lattes.cnpq.br/6303760195972174
Giselle Silva de Souza, e-mail: giselle.silva908@gmail.com URL lattes: http://lattes.cnpq.br/7391062473926377
José Vitor da Silva Nunes, e-mail: vitor4899@gmail.com, URL lattes: https://lattes.cnpq.br/9593210495913688
Josilene Pereira Silva, e-mail: pereirasilvajosilene41@gmail.com, URL lattes: http://lattes.cnpq.br/5717569162096842

RESUMO

As doenças causadas por fitopatógenos representam importante limitação à produção agrícola, tornando necessária a adoção de estratégias de manejo mais sustentáveis e integradas. Nesse contexto, os bioinsumos constituem ferramentas promissoras para o controle biológico, por utilizarem microrganismos, metabólitos e outras substâncias de origem biológica capazes de interferir nas relações entre plantas, patógenos e ambiente. Este capítulo teve como objetivo discutir o potencial dos bioinsumos no controle biológico de fitopatógenos agrícolas, abordando os principais agentes utilizados, seus mecanismos de ação, os fatores que condicionam sua eficiência em campo e as novas estratégias de manejo. Para isso, foi realizada uma revisão narrativa da literatura, de abordagem qualitativa, descritiva e analítica, contemplando principalmente estudos publicados entre 2014 e 2025. As evidências analisadas demonstram que fungos, bactérias, leveduras, bacteriófagos, metabólitos naturais e consórcios microbianos podem reduzir o desenvolvimento de fitopatógenos por diferentes mecanismos, incluindo antibiose, competição por nutrientes e sítios de colonização, micoparasitismo, produção de enzimas hidrolíticas, formação de biofilmes e indução de resistência sistêmica nas plantas. Entretanto, a eficiência dos bioinsumos em condições agrícolas depende da interação entre o agente biológico, a cultura, o patógeno, as condições edafoclimáticas, a formulação e o método de aplicação. Estratégias emergentes, como comunidades microbianas sintéticas, micro e nanoencapsulação, bacteriófagos, moléculas de RNA e ferramentas ômicas, apresentam potencial para aumentar a especificidade, a persistência e a estabilidade do controle biológico. Conclui-se que os bioinsumos constituem importantes componentes do manejo integrado de doenças, porém sua utilização eficiente requer seleção de agentes adaptados, padronização da qualidade, validação em condições de campo e integração com outras práticas de manejo, contribuindo para sistemas agrícolas mais eficientes e ambientalmente sustentáveis.

PALAVRAS-CHAVE: controle biológico; bioinsumos; fitopatógenos; microrganismos antagonistas; resistência induzida; manejo integrado de doenças.

1. INTRODUÇÃO

As doenças de plantas constituem um dos principais entraves à produção agrícola, pois reduzem a produtividade, comprometem a qualidade dos produtos e aumentam os custos

associados ao manejo das culturas. Durante décadas, o controle desses problemas esteve fundamentado principalmente no uso de defensivos químicos, os quais apresentam elevada importância fitossanitária, mas podem favorecer a seleção de populações resistentes quando empregados de maneira repetitiva e inadequada. Além disso, preocupações relacionadas à presença de resíduos nos alimentos, à contaminação ambiental e aos efeitos sobre organismos não alvo têm estimulado a busca por métodos mais sustentáveis de proteção vegetal (Köhl *et al.*, 2019). Nesse cenário, o controle biológico destaca-se como componente estratégico do manejo integrado de doenças, por explorar organismos benéficos e seus produtos para limitar a sobrevivência, a multiplicação e a capacidade infectiva dos fitopatógenos (Lahlali *et al.*, 2022).

Os bioinsumos destinados à proteção de plantas compreendem produtos formulados com microrganismos vivos, metabólitos microbianos, extratos vegetais e outras substâncias de origem biológica capazes de interferir nas relações estabelecidas entre plantas, patógenos e ambiente. Entre os principais agentes utilizados encontram-se fungos dos gêneros *Trichoderma* e *Clonostachys*, bactérias pertencentes a *Bacillus*, *Pseudomonas* e *Streptomyces*, além de leveduras, bacteriófagos e consórcios microbianos (El-Saadony *et al.*, 2022). Esses componentes podem atuar diretamente sobre os fitopatógenos ou modificar a resposta fisiológica e imunológica das plantas, resultando em efeitos que ultrapassam a simples substituição dos produtos químicos convencionais (Pandit *et al.*, 2022). A diversidade dos agentes e de suas funções amplia as possibilidades de aplicação dos bioinsumos em diferentes culturas e etapas do sistema produtivo.

A ação dos bioinsumos envolve mecanismos como competição por nutrientes e sítios de colonização, antibiose, produção de enzimas hidrolíticas, micoparasitismo, formação de biofilmes e interferência na comunicação celular dos patógenos. Paralelamente, microrganismos benéficos podem induzir resistência sistêmica, estimular o estado de *priming*, favorecer a absorção de nutrientes e promover o crescimento e a tolerância das plantas aos estresses bióticos e abióticos (Yu *et al.*, 2022). Fungos do gênero *Trichoderma*, por exemplo, podem associar micoparasitismo, produção de metabólitos antifúngicos e ativação das defesas vegetais (Yao *et al.*, 2023). Da mesma forma, espécies de *Bacillus* produzem lipopeptídeos, enzimas e compostos voláteis com atividade antimicrobiana, enquanto bactérias do gênero *Pseudomonas* apresentam elevada competência rizosférica e capacidade de produzir sideróforos e diferentes metabólitos antagonistas (Mehmood *et al.*, 2023).

Apesar do potencial demonstrado em condições controladas, a eficiência dos bioinsumos no campo permanece variável. O estabelecimento e a atividade dos agentes biológicos são influenciados pela temperatura, disponibilidade hídrica, pH, textura e fertilidade

do solo, bem como pelo genótipo vegetal e pelas interações com a microbiota residente (O'Callaghan *et al.*, 2022). A formulação, a concentração do inóculo, o período de armazenamento e o método de aplicação também determinam a quantidade de células ou propágulos viáveis que alcança o local de ação (Mitter *et al.*, 2021). Consequentemente, um microrganismo que apresenta elevada atividade antagonista em laboratório pode não reproduzir o mesmo desempenho em ambientes agrícolas, especialmente quando não possui adaptação às condições edafoclimáticas ou compatibilidade com os demais componentes do manejo.

A superação dessas limitações tem impulsionado novas estratégias baseadas no conhecimento da ecologia microbiana, na seleção de linhagens adaptadas e no desenvolvimento de formulações mais estáveis. Ferramentas metagenômicas e outras abordagens ômicas têm permitido identificar grupos microbianos associados à supressão de doenças e compreender suas funções nos microbiomas da rizosfera e da filosfera (Trivedi *et al.*, 2020). Simultaneamente, consórcios microbianos e comunidades sintéticas vêm sendo planejados para reunir mecanismos complementares e aumentar a estabilidade funcional dos inoculantes (Martins *et al.*, 2023). Tecnologias de micro e nanoencapsulação, sistemas de liberação controlada, bacteriófagos e moléculas de RNA de fita dupla também representam alternativas promissoras para aumentar a especificidade, a persistência e a eficiência do controle biológico (Saberi-Riseh *et al.*, 2022).

Entretanto, a consolidação dessas tecnologias requer padronização da qualidade, validação em diferentes ambientes, compreensão dos possíveis efeitos ecológicos e integração com práticas culturais, genéticas, físicas e químicas. Os bioinsumos não devem ser compreendidos como soluções isoladas ou universalmente eficazes, mas como ferramentas que precisam ser selecionadas de acordo com a cultura, o patógeno, o nível de pressão da doença e as características do agroecossistema (Collinge *et al.*, 2022). Nesse sentido, este capítulo tem como objetivo discutir o potencial dos bioinsumos no controle biológico de fitopatógenos agrícolas, abordando os principais agentes utilizados, seus mecanismos de ação sobre patógenos e plantas, os fatores que determinam sua eficiência em condições de campo e as novas estratégias destinadas a ampliar sua estabilidade e integração ao manejo sustentável de doenças.

2. METODOLOGIA

O presente capítulo caracteriza-se como uma revisão narrativa da literatura, de abordagem qualitativa e caráter descritivo e analítico, desenvolvida com o propósito de reunir, interpretar e integrar evidências científicas sobre o potencial dos bioinsumos no controle biológico de fitopatógenos agrícolas. A revisão concentrou-se nos principais agentes biológicos

empregados na proteção de plantas, nos mecanismos de ação exercidos diretamente sobre os patógenos e indiretamente sobre os hospedeiros, nos fatores responsáveis pela variabilidade de sua eficiência em condições agrícolas e nas novas estratégias destinadas ao aprimoramento do controle biológico.

A pesquisa foi orientada pela seguinte questão: de que maneira os bioinsumos podem atuar sobre fitopatógenos e plantas e quais fatores determinam sua eficiência e integração aos programas de manejo de doenças agrícolas? Para responder a essa questão, foram consultadas publicações científicas e técnico-científicas relacionadas ao controle biológico de doenças, aos inoculantes microbianos, à interação planta–microrganismo, à indução de resistência vegetal, à formulação de produtos biológicos e às tecnologias emergentes aplicadas à proteção de culturas.

As buscas bibliográficas abrangeram estudos publicados principalmente entre 2014 e 2025, sem excluir referências clássicas consideradas indispensáveis à fundamentação dos conceitos de controle biológico, antagonismo microbiano, promoção do crescimento vegetal, silenciamento gênico e formulação de inoculantes. A estratégia de busca empregou descritores em português e inglês, combinados por meio dos operadores booleanos AND e OR, incluindo os termos *bioinputs*, *biological control*, *plant pathogens*, *microbial inoculants*, *biocontrol agents*, *plant growth-promoting microorganisms*, *induced systemic resistance*, *microbial consortia*, *synthetic microbial communities*, *bacteriophages*, *RNA interference*, *microencapsulation* e *integrated disease management*, além de suas correspondências em português.

Foram priorizados artigos científicos, revisões, capítulos de livros e documentos técnico-científicos que apresentassem relação direta com a utilização de fungos, bactérias, actinobactérias, leveduras, bacteriófagos, extratos vegetais, metabólitos microbianos e consórcios no controle de fitopatógenos. Também foram considerados estudos que avaliassem mecanismos como antibiose, competição por nutrientes e sítios de colonização, micoparasitismo, produção de enzimas hidrolíticas, formação de biofilmes, indução de resistência e promoção do crescimento vegetal. Foram excluídas publicações sem relação direta com a questão orientadora, trabalhos voltados exclusivamente à biofertilização sem avaliação de efeitos fitossanitários e documentos que não apresentassem informações suficientes para a interpretação dos resultados.

Após a identificação das publicações, realizou-se a leitura dos títulos e resumos para verificar sua adequação aos objetivos do capítulo. Os estudos potencialmente relevantes foram examinados integralmente, considerando-se a clareza metodológica, a pertinência temática e sua contribuição para a compreensão da atuação e da eficiência dos bioinsumos. Por se tratar

de uma revisão narrativa, a seleção das fontes não teve como finalidade produzir uma estimativa quantitativa combinada dos efeitos, mas elaborar uma síntese crítica e aplicada das evidências disponíveis em diferentes culturas, condições ambientais, sistemas produtivos e patossistemas.

As informações extraídas foram organizadas considerando autor e ano de publicação, cultura avaliada, fitopatógeno-alvo, agente de controle biológico, tipo de formulação, método de aplicação, mecanismo de ação e resultados fitossanitários observados. Quando disponíveis, também foram examinadas informações relacionadas à concentração do inóculo, viabilidade durante o armazenamento, capacidade de colonização, persistência no ambiente, condições edafoclimáticas e compatibilidade com outros componentes do manejo. A comparação entre os trabalhos buscou identificar resultados convergentes, divergências e respostas dependentes do contexto, reconhecendo que a eficiência de determinado bioinsumo não pode ser automaticamente extrapolada entre culturas, patógenos, genótipos vegetais e ambientes de produção.

A síntese das evidências foi estruturada em quatro eixos temáticos: principais bioinsumos utilizados no controle biológico de fitopatógenos; mecanismos de ação dos bioinsumos sobre patógenos e plantas; fatores que determinam sua eficiência em condições agrícolas; e novas estratégias de manejo e perspectivas para o controle biológico. Essa organização permitiu integrar conhecimentos microbiológicos, fitopatológicos, ecológicos e agronômicos, convertendo os resultados da literatura em fundamentos aplicáveis à seleção, à formulação e à utilização dos bioinsumos em programas de manejo integrado e sustentável de doenças de plantas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Principais bioinsumos utilizados no controle biológico de fitopatógenos

Os bioinsumos empregados no controle biológico de fitopatógenos compreendem formulações constituídas por microrganismos vivos, seus metabólitos ou substâncias naturais capazes de reduzir a sobrevivência, a multiplicação ou a capacidade infectiva dos agentes causadores de doenças. Entre os produtos microbianos, destacam-se aqueles formulados com fungos, bactérias, leveduras e bacteriófagos, cuja ação pode ocorrer diretamente sobre o patógeno ou indiretamente por meio da ativação das defesas vegetais (Lahlali *et al.*, 2022). Esses agentes atuam mediante mecanismos como competição por nutrientes e sítios de colonização, antibiose, produção de enzimas hidrolíticas, parasitismo e indução de resistência sistêmica (Pandit *et al.*, 2022).

Além da supressão de doenças, algumas rizobactérias e alguns fungos benéficos favorecem a absorção de nutrientes, o desenvolvimento radicular e a tolerância das plantas a estresses, ampliando a funcionalidade agronômica dos produtos (El-Saadony *et al.*, 2022). Entretanto, a eficácia desses bioinsumos depende da capacidade de estabelecimento do agente no ambiente de aplicação, da compatibilidade com a cultura e da interação com as condições edafoclimáticas, aspectos determinantes para que o desempenho observado em laboratório seja mantido em campo (Collinge *et al.*, 2022).

Entre os fungos utilizados como bioinsumos, espécies de *Trichoderma* ocupam posição de destaque devido à capacidade de controlar patógenos habitantes do solo e agentes associados às raízes, às sementes e à parte aérea. Espécies como *T. harzianum*, *T. asperellum*, *T. virens* e *T. atroviride* apresentam rápido crescimento, elevada capacidade de colonização e versatilidade metabólica, características que favorecem a competição com espécies de *Fusarium*, *Rhizoctonia*, *Sclerotinia*, *Macrophomina*, *Botrytis* e oomicetos fitopatogênicos (Yao *et al.*, 2023). O micoparasitismo constitui um dos seus principais mecanismos, envolvendo reconhecimento do hospedeiro, enrolamento das hifas e secreção de quitinases, glucanases e proteases capazes de degradar a parede celular do fitopatógeno (Asad *et al.*, 2022).

Paralelamente, metabólitos secundários e compostos orgânicos voláteis produzidos por esses fungos inibem a germinação de esporos e o crescimento micelial, enquanto a colonização das raízes pode estimular respostas defensivas mediadas por ácido jasmônico, etileno e ácido salicílico (Guzmán-Guzmán *et al.*, 2023). Outros fungos e leveduras, incluindo espécies de *Clonostachys*, *Ampelomyces*, *Aureobasidium*, *Metschnikowia* e *Pichia*, também vêm sendo explorados, especialmente contra patógenos foliares e agentes de podridões pós-colheita, por apresentarem intensa competição por espaço e nutrientes, produção de compostos antifúngicos e capacidade de formar biofilmes sobre frutos e tecidos vegetais (Fenta *et al.*, 2023).

Entre os bioinsumos bacterianos, produtos à base de *Bacillus* spp. são amplamente empregados em razão da formação de endósporos resistentes, que aumentam a estabilidade das formulações, facilitam o armazenamento e favorecem a sobrevivência após a aplicação. Espécies como *B. subtilis*, *B. velezensis*, *B. amyloliquefaciens* e *B. pumilus* produzem lipopeptídeos das famílias das iturinas, fengicinas e surfactinas, além de enzimas líticas, bacteriocinas e compostos voláteis que comprometem membranas celulares e inibem diferentes fungos, bactérias e oomicetos fitopatogênicos (Zhang *et al.*, 2023). A atuação dessas bactérias não se restringe à antibiose, pois sua colonização na rizosfera pode intensificar a competição por recursos, formar biofilmes protetores e ativar mecanismos de resistência sistêmica induzida na planta (Saiyam *et al.*, 2024).

Espécies de *Pseudomonas*, principalmente aquelas pertencentes ao grupo fluorescente, também apresentam elevado potencial por produzir sideróforos, fenazinas, pirrolnitrina, 2,4-diacetilfloroglucinol, enzimas hidrolíticas e compostos orgânicos voláteis, restringindo o desenvolvimento do patógeno e a disponibilidade de ferro na rizosfera (Mehmood *et al.*, 2023). Adicionalmente, actinobactérias do gênero *Streptomyces* constituem fontes importantes de antibióticos, enzimas extracelulares e metabólitos especializados, podendo controlar patógenos fúngicos e bacterianos e, simultaneamente, favorecer o crescimento e a ativação das respostas defensivas vegetais (Dow *et al.*, 2023).

Outras categorias de bioinsumos ampliam as possibilidades de manejo, sobretudo quando os produtos microbianos convencionais apresentam espectro de ação limitado. Extratos vegetais e óleos essenciais obtidos de plantas aromáticas e medicinais possuem terpenos, compostos fenólicos, alcalóides e outras moléculas capazes de alterar a permeabilidade das membranas, inibir enzimas e reduzir a germinação ou a esporulação dos fitopatógenos (Greff *et al.*, 2023). Os bacteriófagos, por sua vez, são vírus que infectam seletivamente células bacterianas, apresentando potencial para o controle de doenças causadas por *Pseudomonas*, *Xanthomonas*, *Ralstonia*, *Pectobacterium* e *Erwinia*; sua elevada especificidade reduz efeitos sobre microrganismos não alvo, embora também possa restringir o espectro de ação do produto (Liu *et al.*, 2024).

Nesse contexto, combinações de bacteriófagos podem ampliar o número de estirpes bacterianas controladas e diminuir a probabilidade de seleção de resistência, tendo apresentado desempenho superior ao uso de fagos isolados em alguns patossistemas (Jiang *et al.*, 2023). Da mesma forma, consórcios formados por microrganismos funcionalmente complementares vêm sendo desenvolvidos para reunir antibiose, competição, colonização radicular e indução de resistência em uma única formulação; contudo, sua elaboração exige comprovação de compatibilidade entre as estirpes e estabilidade durante a produção e o armazenamento (Nunes *et al.*, 2024). Assim, a escolha do bioinsumo deve considerar o patógeno-alvo, a cultura, o ambiente de aplicação, a formulação e a integração com outras práticas, pois o sucesso do controle biológico depende não apenas do potencial antagonista do agente, mas também de sua adaptação ao sistema produtivo. Os principais bioinsumos empregados no controle biológico de fitopatógenos, bem como seus mecanismos de ação e respectivos grupos-alvo, estão sintetizados na Tabela 1.

Tabela 1. Principais bioinsumos utilizados no controle biológico de fitopatógenos e seus mecanismos de ação

Tipo de bioinsumo	Principais exemplos	Principais mecanismos de ação	Fitopatógenos/grupos-alvo	Referências
Fungos – *Trichoderma* spp.	*T. harzianum*, *T. asperellum*, *T. virens*, *T. atroviride*	Micoparasitismo; competição por espaço e nutrientes; produção de quitinases, glucanases e proteases; metabólitos secundários e compostos voláteis; indução de resistência	*Fusarium*, *Rhizoctonia*, *Sclerotinia*, *Macrophomina*, *Botrytis* e oomicetos	Yao *et al.* (2023); Asad *et al.* (2022); Guzmán-Guzmán *et al.* (2023)
Outros fungos e leveduras	*Clonostachys*, *Ampelomyces*, *Aureobasidium*, *Metschnikowia*, *Pichia*	Competição por espaço e nutrientes; produção de compostos antifúngicos; formação de biofilmes	Patógenos foliares e agentes de podridões pós-colheita	Fenta *et al.* (2023)
Bactérias – *Bacillus* spp.	*B. subtilis*, *B. velezensis*, *B. amyloliquefaciens*, *B. pumilus*	Produção de iturinas, fengicinas e surfactinas; enzimas líticas; bacteriocinas; compostos voláteis; competição; formação de biofilmes; resistência sistêmica induzida	Fungos, bactérias e oomicetos fitopatogênicos	Zhang *et al.* (2023); Saiyam *et al.* (2024)
Bactérias – *Pseudomonas* spp.	Principalmente espécies do grupo fluorescente	Produção de sideróforos, fenazinas, pirrolnitrina e 2,4-diacetilfloroglucinol; enzimas hidrolíticas; compostos voláteis; competição por ferro	Diferentes fitopatógenos, especialmente na rizosfera	Mehmood *et al.* (2023)

Actinobactérias	*Streptomyces* spp.	Produção de antibióticos, enzimas extracelulares e metabólitos especializados; promoção de crescimento; ativação das defesas vegetais	Patógenos fúngicos e bacterianos	Dow *et al.* (2023)
Extratos vegetais e óleos essenciais	Produtos derivados de plantas aromáticas e medicinais	Terpenos, compostos fenólicos e alcaloides; alteração da permeabilidade de membranas; inibição enzimática; redução da germinação e esporulação	Diversos fitopatógenos	Greff *et al.* (2023)
Bacteriófagos	Fagos específicos e combinações de fagos	Infecção e lise seletiva de células bacterianas; alta especificidade ao hospedeiro	*Pseudomonas*, *Xanthomonas*, *Ralstonia*, *Pectobacterium* e *Erwinia*	Liu *et al.* (2024); Jiang *et al.* (2023)
Consórcios microbianos	Combinações de microrganismos funcionalmente complementares	Associação de antibiose, competição, colonização radicular e indução de resistência	Variável conforme as estirpes utilizadas	Nunes *et al.* (2024)

Fonte: Autores (2026).

3.2 Mecanismos de ação dos bioinsumos sobre fitopatógenos e plantas

Os bioinsumos microbianos atuam no controle de fitopatógenos por mecanismos diretos e indiretos, que podem ocorrer simultaneamente. Entre os mecanismos diretos destacam-se antibiose, competição por nutrientes e sítios de colonização, produção de enzimas hidrolíticas, parasitismo e interferência na comunicação celular dos patógenos (El-Saadony *et al*., 2022). Paralelamente, microrganismos benéficos podem melhorar a nutrição e estimular as defesas vegetais, reduzindo a suscetibilidade à infecção (Minchev *et al*., 2021). A predominância desses mecanismos depende da linhagem microbiana, do patossistema e das condições ambientais (Villavicencio-Vásquez *et al*., 2025), evidenciando que a eficiência do biocontrole resulta de múltiplas interações funcionais (Zehra *et al*., 2021).

A antibiose constitui importante mecanismo de supressão, envolvendo metabólitos capazes de interferir em processos celulares essenciais dos patógenos. Espécies de *Trichoderma* produzem peptaibóis, policetídeos, terpenos e compostos voláteis, além de exercerem micoparasitismo por meio do reconhecimento, contato e degradação das hifas (Yao *et al*., 2023; Mukherjee *et al*., 2022). Nesse processo, quitinases, β-1,3-glucanases e proteases contribuem para a lise da parede celular fúngica. Actinobactérias e espécies de *Streptomyces* também produzem antibióticos, sideróforos e enzimas extracelulares, ampliando seu potencial contra diferentes fitopatógenos (Kaur *et al*., 2023; Kovaleski *et al*., 2025).

A competição por espaço e nutrientes também é relevante, sobretudo na rizosfera. *Pseudomonas* apresenta elevada capacidade de colonização e formação de biofilmes, ocupando sítios que poderiam ser utilizados pelos patógenos (Mehmood *et al*., 2023). A produção de sideróforos reduz a disponibilidade de ferro, enquanto espécies de *Bacillus* produzem lipopeptídeos como surfactina, iturina e fengicina, capazes de comprometer membranas celulares dos fitopatógenos (Nihorimbere *et al*., 2024). Em *Bacillus velezensis* e *Streptomyces*, a produção de diferentes metabólitos antimicrobianos contribui para inibir germinação, crescimento e esporulação, reduzindo a pressão de inóculo (Kenfaoui *et al*., 2024; Wang *et al*., 2024).

Além da supressão direta, os bioinsumos podem induzir resistência sistêmica na planta por meio da ativação de vias relacionadas principalmente ao ácido jasmônico e ao etileno (Yu *et al*., 2022). Esse processo pode estabelecer um estado de *priming*, favorecendo respostas mais rápidas após a infecção, incluindo produção de espécies reativas de oxigênio, fitoalexinas, compostos fenólicos, proteínas relacionadas à patogênese e reforço da parede celular (Salwan *et al*., 2023; Wilson *et al*., 2023). Microrganismos benéficos também podem promover crescimento e nutrição, como ocorre com fungos micorrízicos, *Bacillus* e *Trichoderma*, que favorecem a absorção de nutrientes e o desenvolvimento radicular (Wang *et al*., 2022; Santoyo *et al*., 2024). Endófitos ainda podem ocupar nichos internos e formar barreiras biológicas contra patógenos (Rabbee *et al*., 2024), reforçando a importância de selecionar linhagens capazes de colonizar a planta e expressar múltiplos mecanismos de forma persistente (Xiao *et al*., 2023).

3.3 Fatores que determinam a eficiência dos bioinsumos em condições agrícolas

A eficiência dos bioinsumos em campo depende da interação entre produto, ambiente, genótipo vegetal e manejo. Embora microrganismos benéficos apresentem bom desempenho em laboratório, sua resposta agrícola pode variar devido à competição, predação e oscilações de temperatura e umidade. Essa inconsistência está relacionada à dificuldade de selecionar

microrganismos capazes de permanecer funcionalmente ativos em diferentes solos e sistemas produtivos (Kaminsky *et al*., 2019). Além da cepa, concentração do inóculo, formulação, método de aplicação e adaptação às condições locais influenciam a sobrevivência e a colonização do agente (Mitter *et al*., 2021; O'Callaghan *et al*., 2022). Assim, a eficiência deve ser compreendida como resultado da interação microrganismo–planta–ambiente (Díaz-Rodríguez *et al*., 2025).

Temperatura, disponibilidade hídrica, pH, textura, salinidade, matéria orgânica e fertilidade condicionam a sobrevivência e a atividade dos agentes biológicos. A persistência dos inoculantes depende da tolerância às condições ambientais e da capacidade de competir com a microbiota residente (Benmrid *et al*., 2023). A baixa adaptação às condições bióticas e abióticas locais constitui importante causa de perda de eficiência no campo (Ayaz *et al*., 2023), enquanto a composição do microbioma do solo pode modificar a resposta à inoculação (Lutz *et al*., 2023). Metanálises confirmam ainda que os efeitos variam conforme o grupo microbiano, a cultura e o ambiente avaliado (Azarbad *et al*., 2024).

A formulação e a qualidade microbiológica também são determinantes. O produto deve preservar identidade, pureza, concentração e viabilidade durante produção, armazenamento e aplicação. Carreadores adequados protegem as células e favorecem sua sobrevivência e estabelecimento no ambiente (Bashan *et al*., 2014; Vassilev *et al*., 2020). A dose deve garantir população suficiente para colonização do nicho-alvo (Khan *et al*., 2023), enquanto a microencapsulação pode prolongar a vida útil e promover liberação gradual, desde que exista compatibilidade entre polímero, cepa e ambiente (Kaur *et al*., 2023).

O momento, o local e o método de aplicação também influenciam o desempenho. Radiação intensa, baixa umidade e temperaturas extremas podem reduzir a viabilidade de microrganismos aplicados às folhas (Quesada-Moraga, 2024). No solo, aplicações em sementes, mudas, sulcos ou fertirrigação podem favorecer o estabelecimento próximo às raízes, desde que as condições sejam adequadas. A distribuição do organismo-alvo e sua ecologia também devem ser consideradas (Abd-Elgawad, 2020), assim como a compatibilidade com fertilizantes, defensivos e adjuvantes, que podem afetar a atividade dos agentes biológicos (Tut *et al*., 2021). Por isso, sua utilização tende a ser mais eficiente quando integrada a outras práticas de manejo (Galli *et al*., 2024).

As interações entre inoculante, planta e microbioma residente explicam parte da variabilidade observada, pois exsudatos radiculares e comunidades nativas podem favorecer, restringir ou modificar a colonização. A introdução de microrganismos pode alterar a estrutura da microbiota do solo, dependendo do contexto ecológico (Mawarda *et al*., 2020). Consórcios

microbianos podem aumentar a complementaridade funcional, embora combinações inadequadas também possam gerar antagonismo (Shayanthan *et al*., 2022). Apesar de inoculantes apresentarem potencial para elevar a produtividade, as respostas variam entre culturas e sistemas de manejo (Li *et al*., 2022), reforçando a necessidade de validação em diferentes safras e condições produtivas (Bansal *et al*., 2025).

Portanto, respostas consistentes dependem de cepas adaptadas, formulações estáveis, controle de qualidade e recomendações específicas para cada ambiente. A caracterização do solo, o monitoramento das condições de aplicação, a pressão do organismo-alvo e a compatibilidade com outros insumos devem integrar o planejamento. Ensaios em diferentes locais e safras também são essenciais para definir doses e métodos de aplicação, reduzindo a distância entre o desempenho experimental e a eficiência comercial dos bioinsumos.

3.4 Novas estratégias de manejo e perspectivas para o controle biológico

O controle biológico de fitopatógenos tem avançado da seleção empírica de antagonistas para estratégias baseadas na ecologia do microbioma vegetal. A metagenômica permite identificar grupos microbianos associados à supressão de doenças e compreender interações na rizosfera e na filosfera (Trivedi *et al*., 2020). Com base nessas informações, comunidades microbianas sintéticas (SynComs) podem reunir isolados com mecanismos complementares de antagonismo (Martins *et al*., 2023). Em tomateiro, SynComs aumentaram a estabilidade do microbioma radicular e reduziram a murcha causada por *Fusarium oxysporum* (Zhou *et al*., 2022), enquanto consórcios de *Bacillus subtilis* e *Pseudomonas fluorescens* diminuíram a incidência da pinta-preta e favoreceram microrganismos benéficos (Jia *et al*., 2023). Esses resultados reforçam a importância da compatibilidade, colonização e estabilidade funcional dos microrganismos na formulação de bioinsumos.

O aprimoramento das formulações também é essencial para aumentar a sobrevivência dos agentes biológicos. Tecnologias de nano e microencapsulação podem protegê-los contra dessecação, radiação e variações térmicas, além de permitir liberação gradual (Saberi-Riseh *et al*., 2022). Matrizes biodegradáveis à base de amido também têm demonstrado potencial para preservar bactérias antagonistas (Saberi-Riseh *et al*., 2023). No tratamento de sementes, *Bacillus velezensis* encapsulado aumentou a sobrevivência bacteriana e a proteção contra *Plasmodiophora brassicae* (Abdukerim *et al*., 2023), enquanto sistemas de carragenana e trealose favoreceram a liberação controlada de bactérias utilizadas contra podridões-moles (Sason *et al*., 2023).

Os bacteriófagos constituem alternativa promissora para o controle de doenças bacterianas devido à elevada especificidade pelo hospedeiro (Jaglan *et al*., 2024). Coquetéis de fagos reduziram populações de *Ralstonia solanacearum* e a intensidade da murcha bacteriana em tomateiro (Wang *et al*., 2024), além de apresentarem eficiência contra *Pectobacterium carotovorum* (Vu *et al*., 2024). Entretanto, a seleção de bactérias resistentes pode comprometer sua eficácia, exigindo seleção de fagos líticos, formulações protetoras e monitoramento da sensibilidade das populações bacterianas (Rabiey *et al*., 2024).

Tecnologias baseadas em RNA também possibilitam o controle seletivo de fitopatógenos. O silenciamento gênico induzido por pulverização utiliza RNA de fita dupla para inativar genes essenciais à sobrevivência ou virulência do patógeno (Koch *et al*., 2016). Vesículas extracelulares vegetais podem participar do transporte de pequenos RNAs para células fúngicas (He *et al*., 2021), enquanto nanocarreadores podem aumentar a estabilidade dessas moléculas na superfície vegetal (Mitter *et al*., 2017). Contudo, diferenças na absorção do RNA entre espécies podem limitar sua eficiência, exigindo ajustes do gene-alvo, concentração e sistema de aplicação (Qiao *et al*., 2021).

A consolidação dessas tecnologias dependerá de sua integração ao manejo da cultura, pois solo, clima, genótipo vegetal e microbiota residente influenciam o desempenho dos agentes biológicos (Köhl *et al*., 2019). A associação com cultivares resistentes, rotação de culturas, matéria orgânica, manejo hídrico e uso racional de defensivos tende a proporcionar maior estabilidade no campo (Lahlali *et al*., 2022). Ferramentas ômicas e modelos computacionais podem auxiliar na seleção de isolados e combinações adaptadas a diferentes ambientes (Massart *et al*., 2015), enquanto ensaios multilocais, padronização da qualidade e regulamentação adequada serão necessários para ampliar sua aplicação comercial (Collinge *et al*., 2022).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os bioinsumos apresentam elevado potencial para o controle sustentável de fitopatógenos agrícolas, atuando por mecanismos como antibiose, competição, micoparasitismo, produção de enzimas e indução de resistência nas plantas. Fungos, bactérias, leveduras, bacteriófagos, metabólitos naturais e consórcios microbianos ampliam as possibilidades de manejo e podem contribuir simultaneamente para a redução das doenças, a promoção do crescimento e o fortalecimento da tolerância vegetal aos estresses.

Entretanto, a eficiência desses produtos em campo depende da interação entre o agente biológico, a cultura, o patógeno, o ambiente, a formulação e o método de aplicação. A seleção

de linhagens adaptadas, o controle de qualidade, a manutenção da viabilidade e a validação em diferentes safras e condições edafoclimáticas são fundamentais para reduzir a variabilidade dos resultados.

As novas estratégias baseadas em comunidades microbianas sintéticas, encapsulação, bacteriófagos, moléculas de RNA e ferramentas ômicas poderão aumentar a especificidade, a persistência e a estabilidade dos bioinsumos. Contudo, sua consolidação exige pesquisas em condições agrícolas, regulamentação adequada e integração com práticas culturais, genéticas, físicas e químicas. Dessa forma, os bioinsumos devem ser compreendidos como componentes do manejo integrado de doenças, e não como soluções isoladas, contribuindo para sistemas produtivos mais eficientes e ambientalmente sustentáveis.

REFERÊNCIAS

ABD-ELGAWAD, M. M. M.; ASKARY, T. H. Factors affecting success of biological agents used in controlling the plant-parasitic nematodes. Egyptian Journal of Biological Pest Control, v. 30, art. 17, 2020. DOI: https://doi.org/10.1186/s41938-020-00215-2.

ABDUKERIM, R.; LI, X.; WANG, X.; ZHANG, Y.; LIU, B.; ZHANG, Z. Seed pelleting with gum Arabic-encapsulated biocontrol bacteria for the management of clubroot disease. Frontiers in Microbiology, v. 14, 2023.

ASAD, S. A. Mechanisms of action and biocontrol potential of Trichoderma against fungal plant diseases: a review. Ecological Complexity, v. 49, art. 100978, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2021.100978.

AYAZ, M.; LI, C.-H.; ALI, Q.; ZHAO, W.; CHI, Y.-K.; SHAFIQ, M.; ALI, F.; YU, X.-Y.; YU, Q.; ZHAO, J.-T.; YU, J.-W.; QI, R.; HUANG, W. Bacterial and fungal biocontrol agents for plant disease protection: journey from lab to field, current status, challenges, and global perspectives. Molecules, v. 28, n. 18, art. 6735, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/molecules28186735.

AZARBAD, H.; JUNKER, R. R. Biological and experimental factors that define the effectiveness of microbial inoculation on plant traits: a meta-analysis. ISME Communications, v. 4, n. 1, art. ycae122, 2024. DOI: https://doi.org/10.1093/ismeco/ycae122.

BANSAL, R.; VYAS, P.; SHARMA, S. Formulation and field performance of liquid phosphate-solubilizing bacterial biofertilizer for improved growth, yield, and nutrient content of potato. Frontiers in Microbiology, v. 16, art. 1734471, 2025. DOI: https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1734471.

BASHAN, Y.; DE-BASHAN, L. E.; PRABHU, S. R.; HERNANDEZ, J.-P. Advances in plant growth-promoting bacterial inoculant technology: formulations and practical perspectives (1998–2013). Plant and Soil, v. 378, n. 1–2, p. 1–33, 2014. DOI: https://doi.org/10.1007/s11104-013-1956-x.

BENMRID, B.; GHOULAM, C.; ZEROUAL, Y.; KOUISNI, L.; BARGAZ, A. Bioinoculants as a means of increasing crop tolerance to drought and phosphorus deficiency in legume–cereal intercropping systems. Communications Biology, v. 6, art. 1016, 2023. DOI: https://doi.org/10.1038/s42003-023-05399-5.

COLLINGE, D. B.; JENSEN, D. F.; RABIEY, M.; SARROCCO, S.; SHAW, M. W.; SHAW, R. H. Biological control of plant diseases: what has been achieved and what is the direction? Plant Pathology, v. 71, n. 5, p. 1024–1047, 2022. DOI: https://doi.org/10.1111/ppa.13555.

DÍAZ-RODRÍGUEZ, A. M.; PARRA COTA, F. I.; CIRA CHÁVEZ, L. A.; GARCÍA ORTEGA, L. F.; ESTRADA ALVARADO, M. I.; SANTOYO, G.; DE LOS SANTOS-VILLALOBOS, S. Microbial inoculants in sustainable agriculture: advancements, challenges, and future directions. Plants, v. 14, n. 2, art. 191, 2025. DOI: https://doi.org/10.3390/plants14020191.

DOW, L.; GALLART, M.; RAMARAJAN, M.; LAW, S. R.; THATCHER, L. F. Streptomyces and their specialised metabolites for phytopathogen control: comparative in vitro and in planta metabolic approaches. Frontiers in Plant Science, v. 14, art. 1151912, 2023. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1151912.

EL-SAADONY, M. T.; SAAD, A. M.; SOLIMAN, S. M.; SALEM, H. M.; AHMED, A. I.; MAHMOOD, M.; EL-TAHAN, A. M.; EBRAHIM, A. A. M.; ABD EL-MAGEED, T. A.; NEGM, S. H.; SELIM, S.; BABALGHITH, A. O.; ELRYS, A. S.; EL-TARABILY, K. A.; ABUQAMAR, S. F. Plant growth-promoting microorganisms as biocontrol agents of plant diseases: mechanisms, challenges and future perspectives. Frontiers in Plant Science, v. 13, art. 923880, 2022. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2022.923880.

FENTA, L.; MEKONNEN, H.; KABTIMER, N. The exploitation of microbial antagonists against postharvest plant pathogens. Microorganisms, v. 11, n. 4, art. 1044, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/microorganisms11041044.

GALLI, M.; FELDMANN, F.; VOGLER, U. K.; KOGEL, K.-H. Can biocontrol be the game-changer in integrated pest management? A review of definitions, methods and strategies. Journal of Plant Diseases and Protection, v. 131, p. 265–291, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s41348-024-00878-1.

GREFF, B.; SÁHÓ, A.; LAKATOS, E.; VARGA, L. Biocontrol activity of aromatic and medicinal plants and their bioactive components against soil-borne pathogens. Plants, v. 12, n. 4, art. 706, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/plants12040706.

GUZMÁN-GUZMÁN, P.; KUMAR, A.; SANTOS-VILLALOBOS, S. de los; PARRA-COTA, F. I.; OROZCO-MOSQUEDA, M. del C.; FADIJI, A. E.; HYDER, S.; BABALOLA, O. O.; SANTOYO, G. Trichoderma species: our best fungal allies in the biocontrol of plant diseases—a review. Plants, v. 12, n. 3, art. 432, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/plants12030432.

HE, B.; CAI, Q.; QIAO, L.; HUANG, C. Y.; WANG, S.; MIAO, W.; HAUSSECKER, M.; JIN, H. RNA-binding proteins contribute to small RNA loading in plant extracellular vesicles. Nature Plants, v. 7, p. 342–352, 2021.

JAGLAN, A. B.; KUMAR, S.; BANSAL, K.; CHHIBBER, S. Phage-mediated biocontrol: a promising green solution for plant disease management. Viruses, v. 16, 2024.

JIA, Y.; NIU, H.; ZHAO, P.; LI, X.; YAN, F.; WANG, C.; QIU, Z. Synergistic biocontrol of Bacillus subtilis and Pseudomonas fluorescens against early blight disease in tomato. Applied Microbiology and Biotechnology, v. 107, p. 5719–5734, 2023.

JIANG, H.; LI, C.; HUANG, X.; AHMED, T.; OGUNYEMI, S. O.; YU, S.; WANG, X.; ALI, H. M.; KHAN, F.; YAN, C.; CHEN, J.; LI, B. Phage combination alleviates bacterial leaf blight of rice (Oryza sativa L.). Frontiers in Plant Science, v. 14, art. 1147351, 2023. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1147351.

JUNG, J.; AHN, S.; KIM, D.-H.; RIU, M. Triple interactions for induced systemic resistance in plants. Frontiers in Plant Science, v. 15, art. 1464710, 2024. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1464710.

KAMINSKY, L. M.; TREXLER, R. V.; MALIK, R. J.; HOCKETT, K. L.; BELL, T. H. The inherent conflicts in developing soil microbial inoculants. Trends in Biotechnology, v. 37, n. 2, p. 140–151, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2018.11.011.

KAUR, R.; KAUR, S.; DWIBEDI, V.; KAUR, C.; AKHTAR, N.; ALZAHRANI, A. Development and characterization of rice bran–gum Arabic based encapsulated biofertilizer for enhanced shelf life and controlled bacterial release. Frontiers in Microbiology, v. 14, art. 1267730, 2023. DOI: https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1267730.

KAUR, T.; RANI, R.; MANHAS, R. K. Mechanistic insights into the role of actinobacteria as potential biocontrol candidates against fungal phytopathogens. Applied Microbiology and Biotechnology, 2023.

KENFAOUI, J.; DUTILLOY, E.; BENCHLIH, S.; LAHLALI, R.; AIT-BARKA, E.; ESMAEEL, Q. Bacillus velezensis: a versatile ally in the battle against phytopathogens—insights and prospects. Applied Microbiology and Biotechnology, v. 108, art. 439, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s00253-024-13255-7.

KHAN, A.; SINGH, A. V.; GAUTAM, S. S.; AGARWAL, A.; PUNETHA, A.; UPADHYAYAY, V. K.; KUKRETI, B.; BUNDELA, V.; JUGRAN, A. K.; GOEL, R. Microbial bioformulation: a microbial assisted biostimulating fertilization technique for sustainable agriculture. Frontiers in Plant Science, v. 14, art. 1270039, 2023. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1270039.

KOCH, A.; BIEDENKOPF, D.; FURCH, A.; WEBER, L.; ROSSMANN, T.; ABDALLAHI, S.; LIN, J.; JUDASCHKE, K.; VON TIEDEMANN, A.; KOGEL, K. H. An RNAi-based control of Fusarium graminearum infections through spraying of long dsRNAs involves a plant passage and is controlled by the fungal silencing machinery. PLoS Pathogens, v. 12, n. 10, e1005901, 2016.

KÖHL, J.; KOLNAAR, R.; RAVENSBERG, W. J. Mode of action of microbial biological control agents against plant diseases: relevance beyond efficacy. Frontiers in Plant Science, v. 10, art. 845, 2019.

KOVALESKI, M.; MAURER, T. R.; BANFI, M.; REMOR, M.; RESTELATTO, M.; RIEDER, R.; DEUNER, C. C.; COLLA, L. M. Biocontrol of plant pathogens by actinomycetes: a bibliometric analysis and systematic review. World Journal of Microbiology and Biotechnology, v. 41, n. 7, art. 243, 2025. DOI: https://doi.org/10.1007/s11274-025-04422-7.

LAHLALI, R.; EZRARI, S.; RADOUANE, N.; KENFAOUI, J.; ESMAEEL, Q.; EL HAMSS, H.; BELABESS, Z.; BARKA, E. A. Biological control of plant pathogens: a global perspective. Microorganisms, v. 10, n. 3, art. 596, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/microorganisms10030596.

LI, J.; WANG, J.; LIU, H.; MACDONALD, C. A.; SINGH, B. K. Application of microbial inoculants significantly enhances crop productivity: a meta-analysis of studies from 2010 to 2020. Journal of Sustainable Agriculture and Environment, v. 1, n. 3, p. 216–225, 2022. DOI: https://doi.org/10.1002/sae2.12028.

LIU, L.; WANG, B.; HUANG, A.; ZHANG, H.; LI, Y.; WANG, L. Biological characteristics of the bacteriophage LDT325 and its potential application against the plant pathogen Pseudomonas syringae. Frontiers in Microbiology, v. 15, art. 1370332, 2024. DOI: https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1370332.

LUTZ, S.; BODENHAUSEN, N.; HESS, J.; VALZANO-HELD, A.; WAELCHLI, J.; DESLANDES-HÉROLD, G.; SCHLAEPPI, K.; VAN DER HEIJDEN, M. G. A. Soil microbiome indicators can predict crop growth response to large-scale inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi. Nature Microbiology, v. 8, p. 2277–2289, 2023. DOI: https://doi.org/10.1038/s41564-023-01520-w.

MARTINS, S. J.; ROCHA, G. A.; GEHMAN, L. O. M.; SALLES, J. F. The use of synthetic microbial communities to improve plant health. Phytopathology, v. 113, n. 8, p. 1369–1379, 2023.

MASSART, S.; MARTINEZ-MEDINA, M.; JIJAKLI, M. H. Biological control in the microbiome era: challenges and opportunities. Biological Control, v. 89, p. 98–108, 2015.

MAWARDA, P. C.; LE ROUX, X.; VAN ELSAS, J. D.; SALLES, J. F. Deliberate introduction of invisible invaders: a critical appraisal of the impact of microbial inoculants on soil microbial communities. Soil Biology and Biochemistry, v. 148, art. 107874, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107874.

MEHMOOD, N.; SAEED, M.; ZAFARULLAH, S.; HYDER, S.; RIZVI, Z. F.; GONDAL, A. S.; JAMIL, N.; IQBAL, R.; ALI, B.; ERCISLI, S.; KUPE, M. Multifaceted impacts of plant-beneficial Pseudomonas spp. in managing various plant diseases and crop yield improvement. ACS Omega, v. 8, n. 25, p. 22296–22315, 2023. DOI: https://doi.org/10.1021/acsomega.3c00870.

MINCHEV, Z.; KOSTENKO, O.; SOLER, R.; POZO, M. J. Microbial consortia for effective biocontrol of root and foliar diseases in tomato. Frontiers in Plant Science, v. 12, art. 756368, 2021. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2021.756368.

MITTER, E. K.; TOSI, M.; OBREGÓN, D.; DUNFIELD, K. E.; GERMIDA, J. J. Rethinking crop nutrition in times of modern microbiology: innovative biofertilizer technologies. Frontiers in Sustainable Food Systems, v. 5, art. 606815, 2021. DOI: https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.606815.

MITTER, N.; WORRALL, E. A.; ROBINSON, K. E.; LI, P.; JAIN, R. G.; TAOCHY, C.; FLETCHER, S. J.; CARROLL, B. J.; LU, G. Q.; XU, Z. P. Clay nanosheets for topical delivery of RNAi for sustained protection against plant viruses. Nature Plants, v. 3, art. 16207, 2017.

MUKHERJEE, P. K.; MENDOZA-MENDOZA, A.; ZEILINGER, S.; HORWITZ, B. A. Mycoparasitism as a mechanism of Trichoderma-mediated suppression of plant diseases. Fungal Biology Reviews, v. 39, p. 15–33, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.fbr.2021.11.004.

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

O'CALLAGHAN, M.; BALLARD, R. A.; WRIGHT, D. Soil microbial inoculants for sustainable agriculture: limitations and opportunities. Soil Use and Management, v. 38, n. 3, p. 1340–1369, 2022. DOI: https://doi.org/10.1111/sum.12811.

PANDIT, M. A.; KUMAR, J.; GULATI, S.; BHANDARI, N.; MEHTA, P.; KATYAL, R.; RAWAT, C. D.; MISHRA, V.; KAUR, J. Major biological control strategies for plant pathogens. Pathogens, v. 11, n. 2, art. 273, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/pathogens11020273.

QIAO, L.; LAN, C.; CAPPELLOZZA, S.; AHN, S.; JORDAN, M. H.; GONG, L.; HETHERINGTON, P. R.; ZHAO, H.; XU, H.; PENG, W.; SHI, J.; HAO, Y.; CAO, X.; DENG, Y.; ZHAO, Y.; CHAI, J.; JIN, H. Spray-induced gene silencing for disease control is dependent on the efficiency of pathogen RNA uptake. Plant Biotechnology Journal, v. 19, n. 9, p. 1756–1768, 2021.

QUESADA-MORAGA, E.; GONZÁLEZ-MAS, N.; YOUSEF-YOUSEF, M.; GARRIDO-JURADO, I.; FERNÁNDEZ-BRAVO, M. Key role of environmental competence in successful use of entomopathogenic fungi in microbial pest control. Journal of Pest Science, v. 97, p. 1–15, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s10340-023-01622-8.

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, art. 104229, 2024.

RABIEY, M.; ROYLE, M.; COOK, R.; CARVALHO, G.; JACKSON, R. W. Coevolutionary analysis of Pseudomonas syringae–phage interactions informs the development of bacteriophage biocontrol. Microbial Biotechnology, 2024.

SABERI-RISEH, R.; MORADI-POUR, M.; MOHAMMADINEJAD, R.; THAKUR, V. K. Nano/microencapsulation of plant biocontrol agents by polysaccharides: a review. International Journal of Biological Macromolecules, v. 220, p. 1237–1256, 2022.

SABERI-RISEH, R.; SKORIK, Y. A.; THAKUR, V. K.; MORADI-POUR, M. Encapsulating biocontrol bacteria with starch as a safe and green technology for plant disease management. Carbohydrate Polymers, v. 302, art. 120384, 2023.

SAIYAM, D.; DUBEY, A.; MALLA, M. A.; KUMAR, A. Lipopeptides from Bacillus: unveiling biotechnological prospects—sources, properties, and diverse applications. Brazilian Journal of Microbiology, v. 55, n. 1, p. 281–295, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s42770-023-01228-3.

SALWAN, R.; SHARMA, M.; SHARMA, A.; SHARMA, V. Insights into plant beneficial microorganism-triggered induced systemic resistance. Plant Stress, v. 7, art. 100140, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.stress.2023.100140.

SANTOYO, G.; OROZCO-MOSQUEDA, M. del C.; AFRIDI, M. S.; MITRA, D.; VALENCIA-CANTERO, E.; MACÍAS-RODRÍGUEZ, L. Trichoderma and Bacillus multifunctional allies for plant growth and health in saline soils: recent advances and future challenges. Frontiers in Microbiology, v. 15, art. 1423980, 2024. DOI: https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1423980.

SASON, G.; OPPENHEIMER-SHAANAN, Y.; OFEK-LALZAR, M.; PASTERNAK, Z.; JURKEVITCH, E. Biological control of soft rot in potato by carrageenan–trehalose-encapsulated bacterial predators. Biological Control, v. 176, 2023.

SHAYANTHAN, A.; ORDOÑEZ, P. A. C.; ORESNIK, I. J. The role of synthetic microbial communities (SynCom) in sustainable agriculture. Frontiers in Agronomy, v. 4, art. 896307, 2022. DOI: https://doi.org/10.3389/fagro.2022.896307.

TRIVEDI, P.; LEACH, J. E.; TRINGE, S. G.; SA, T.; SINGH, B. K. Plant–microbiome interactions: from community assembly to plant health. Nature Reviews Microbiology, v. 18, p. 607–621, 2020.

TUT, G.; MAGAN, N.; BRAIN, P.; XU, X. Critical evaluation of two commercial biocontrol agents for their efficacy against Botrytis cinerea under in vitro and in vivo conditions in relation to different abiotic factors. Agronomy, v. 11, n. 9, art. 1868, 2021. DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy11091868.

VASSILEV, N.; VASSILEVA, M.; MARTOS, V.; GARCIA DEL MORAL, L. F.; KOWALSKA, J.; TYLKOWSKI, B.; MALUSÁ, E. Formulation of microbial inoculants by encapsulation in natural polysaccharides: focus on beneficial properties of carrier additives and derivatives. Frontiers in Plant Science, v. 11, art. 270, 2020. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00270.

VILLAVICENCIO-VÁSQUEZ, M.; ESPINOZA-LOZANO, F.; ESPINOZA-LOZANO, L.; CORONEL-LEÓN, J. Biological control agents: mechanisms of action, selection, formulation and challenges in agriculture. Frontiers in Agronomy, v. 7, art. 1578915, 2025. DOI: https://doi.org/10.3389/fagro.2025.1578915.

VU, N. T.; OH, C. S.; LEE, D. H.; PARK, D. H. Bacteriophage cocktail for biocontrol of soft rot disease caused by Pectobacterium carotovorum. Applied Microbiology and Biotechnology, v. 108, art. 11, 2024.

WANG, H.; HAO, Z.; ZHANG, X.; XIE, W.; CHEN, B. Arbuscular mycorrhizal fungi induced plant resistance against Fusarium wilt in jasmonate biosynthesis defective mutant and wild type of tomato. Journal of Fungi, v. 8, n. 5, art. 422, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/jof8050422.

WANG, M.; LI, H.; LI, J.; ZHANG, W.; ZHANG, J. Streptomyces strains and their metabolites for biocontrol of phytopathogens in agriculture. Journal of Agricultural and Food Chemistry, v. 72, n. 4, p. 2077–2088, 2024. DOI: https://doi.org/10.1021/acs.jafc.3c08265.

WANG, X.; WEI, Z.; YANG, K.; WANG, J.; JOUSSET, A.; XU, Y.; FRIMAN, V. P. Phages enhance both phytopathogen density control and resident microbiota-mediated disease suppression. mBio, v. 15, 2024.

WILSON, S. K.; PRETORIUS, T.; NAIDOO, S. Mechanisms of systemic resistance to pathogen infection in plants and their potential application in forestry. BMC Plant Biology, v. 23, art. 404, 2023. DOI: https://doi.org/10.1186/s12870-023-04391-9.

XIAO, Z.; ZHAO, Q.; LI, W.; GAO, L.; LIU, G. Strain improvement of Trichoderma harzianum for enhanced biocontrol capacity: strategies and prospects. Frontiers in Microbiology, v. 14, art. 1146210, 2023. DOI: https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1146210.

YAO, X.; GUO, H.; ZHANG, K.; ZHAO, M.; RUAN, J.; CHEN, J. Trichoderma and its role in biological control of plant fungal and nematode disease. Frontiers in Microbiology, v. 14, art. 1160551, 2023. DOI: https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1160551.

YU, Y.; GUI, Y.; LI, Z.; JIANG, C.; GUO, J.; NIU, D. Induced systemic resistance for improving plant immunity by beneficial microbes. Plants, v. 11, n. 3, art. 386, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/plants11030386.

ZEHRA, A.; RAYTEKAR, N. A.; MEENA, M.; SWAPNIL, P. Efficiency of microbial bio-agents as elicitors in plant defense mechanism under biotic stress: a review. Current Research in Microbial Sciences, v. 2, art. 100054, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2021.100054.

ZHANG, N.; WANG, Z.; SHAO, J.; XU, Z.; LIU, Y.; XUN, W.; MIAO, Y.; SHEN, Q.; ZHANG, R. Biocontrol mechanisms of Bacillus: improving the efficiency of green agriculture. Microbial Biotechnology, v. 16, n. 12, p. 2250–2263, 2023. DOI: https://doi.org/10.1111/1751-7915.14348.

ZHOU, X.; WANG, J.; LIU, F.; LIANG, J.; ZHAO, P.; TSAUI, C. K. M.; CAI, L. Cross-kingdom synthetic microbiota supports tomato suppression of Fusarium wilt disease. Nature Communications, v. 13, art. 7890, 2022.