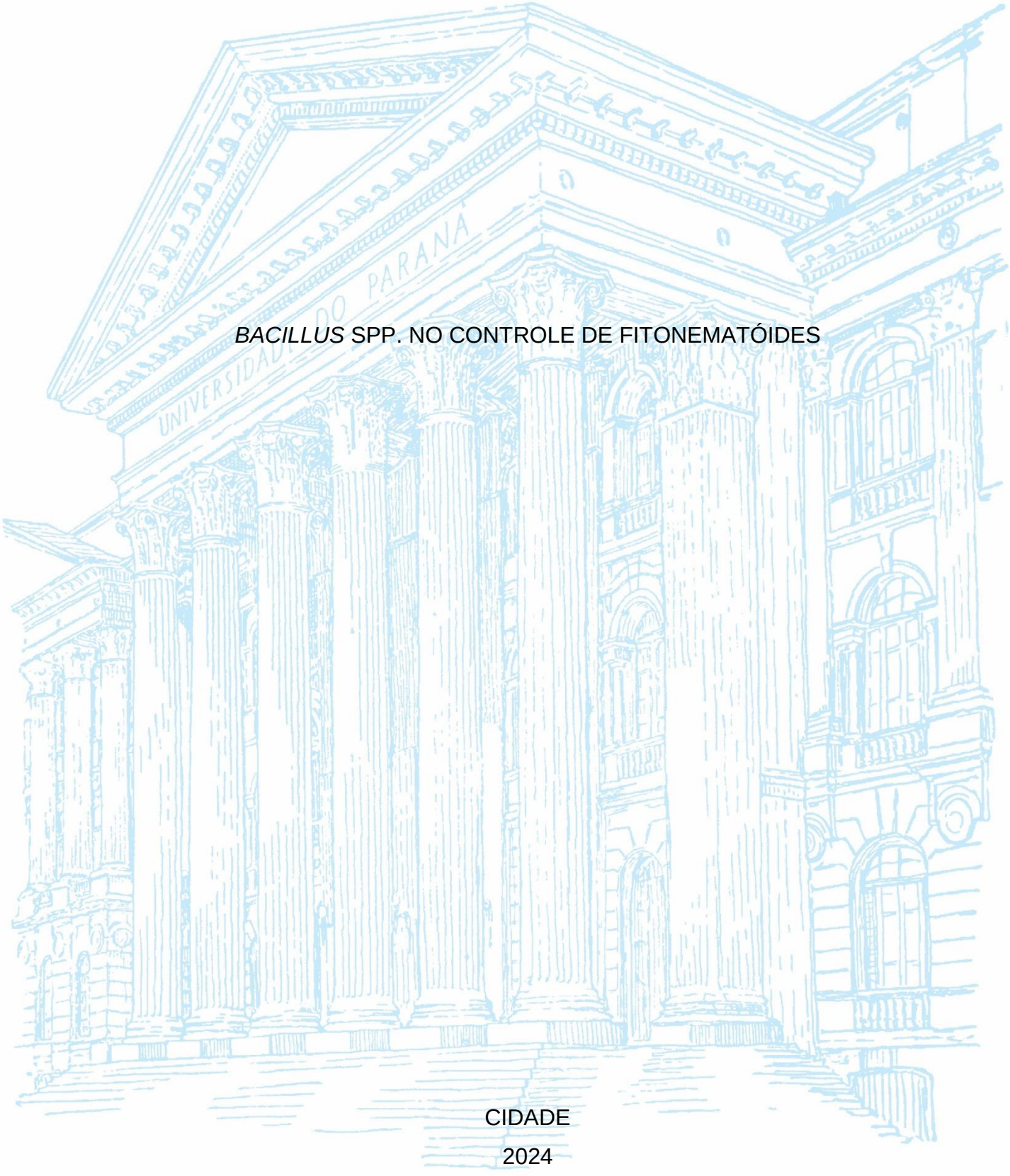
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

NATANAELI CAROLINE FRANCO



BACILLUS SPP. NO CONTROLE DE FITONEMATÓIDES

CIDADE

2024

NATANAELI CAROLINE FRANCO

BACILLUS SPP. NO CONTROLE DE FITONEMATÓIDES

Trabalho de Conclusão apresentado ao curso de Pós-Graduação Lato Sensu em Fitossanidade, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Fitossanidade.

Orientador: Prof. Dr. Sergio Miguel Mazaro

CIDADE

2024

A todos que tornaram essa jornada mais leve e divertida, contribuindo para a realização deste trabalho, expresso minha profunda gratidão.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus que me protegeu nos inúmeros dias de deslocamento da minha cidade até a instituição e sempre com segurança.

A minha família, em especial meus pais José Francisco e Jony mary e meus irmãos pelo incentivo e compreensão.

Agradeço também a equipe de professores e coordenação da instituição, por transmitirem seus conhecimentos e nunca medir esforços para auxiliar nas aulas e condução deste, em especial ao meu orientador Sérgio Miguel Mazaro, pelo incentivo em buscar os melhores resultados e na ajuda no desenvolvimento do meu trabalho.

Aos meus amigos, colegas, pelo companheirismo, afeto e incentivo os quais foram responsáveis por facilitar na adaptação ao ambiente da academia.

Agradecer a UFPR pela oportunidade de realizar a especialização, com tão elevada qualidade de ensino.

A verdadeira riqueza da agricultura está na harmonia entre homem, natureza e comunidade. (NONO PEREIRA)

RESUMO

A cultura da soja, de fundamental importância para a economia brasileira e global, enfrenta desafios significativos decorrentes da infestação por nematoides fitoparasitas. Esses organismos microscópicos, ao penetrarem nas raízes das plantas, causam danos consideráveis, comprometendo a absorção de água e nutrientes, resultando em redução da produtividade e qualidade dos grãos. Diante desse cenário, uma revisão sistemática da literatura, com base em 64 artigos científicos, foi realizada para avaliar o potencial do gênero *Bacillus* no controle biológico de nematoides em soja. A pesquisa abrangeu estudos publicados nos últimos 10 anos em bases de dados como SciELO, CAPES e Google Acadêmico. Os resultados indicam o biocontrole como uma estratégia que utiliza organismos benéficos para controlar nematóides, surge como uma alternativa promissora e sustentável. Entre os agentes de biocontrole, as bactérias do gênero *Bacillus* destacam-se por sua capacidade de suprimir populações de nematoides. Mecanismos como a produção de compostos antimicrobianos, a indução de resistência sistêmica nas plantas e a competição por recursos na rizosfera são os principais responsáveis pela eficácia desses microrganismos. A aplicação de *Bacillus* spp. no solo ou nas sementes tem se mostrado uma ferramenta eficaz para o manejo integrado de nematoides, contribuindo para a redução do uso de nematicidas químicos e promovendo a saúde do solo. Diante do exposto, conclui-se que para a otimização do uso de *Bacillus* spp. no controle de nematoides, são necessárias pesquisas contínuas voltadas para a seleção de isolados com maior potencial de biocontrole, a compreensão dos mecanismos moleculares envolvidos nas interações entre as bactérias, os nematoides e as plantas, e o desenvolvimento de formulações adequadas para a aplicação em campo. Além disso, a integração do biocontrole com outras práticas de manejo, como a rotação de culturas e o uso de variedades de soja resistentes, é fundamental para alcançar um controle mais eficiente e sustentável dos fitonematoides.

Palavras-chave: 1. Nematoides 2. Fitonematóides 3. Biocontrole 4. *Bacillus* 5. Taxonomia de fitonematóides.

ABSTRACT

Soybean cultivation, a cornerstone of global agriculture, is significantly challenged by plant-parasitic nematodes. These microscopic organisms invade plant roots, causing substantial damage that impairs water and nutrient uptake, leading to reduced crop yield and quality. A systematic literature review of 64 research articles, conducted over the past decade using databases such as SciELO, CAPES, and Google Scholar, was undertaken to evaluate the potential of the Bacillus genus for the biological control of nematodes in soybean. The findings highlight biocontrol, a strategy employing beneficial organisms to manage pests, as a promising and sustainable approach. Among biocontrol agents, Bacillus species have demonstrated exceptional efficacy in suppressing nematode populations. Their mechanisms of action include the production of antimicrobial compounds, the induction of systemic resistance in plants, and competition for resources within the rhizosphere. Soil or seed applications of Bacillus spp. have proven effective in integrated nematode management, reducing reliance on chemical nematicides and promoting soil health. To optimize the use of Bacillus spp. in nematode control, ongoing research is essential. This includes the selection of bacterial isolates with superior biocontrol potential, elucidating the molecular mechanisms underlying interactions between bacteria, nematodes, and plants, and developing suitable formulations for field application. Moreover, integrating biocontrol with other management practices, such as crop rotation and the use of resistant soybean cultivars, is crucial for achieving more efficient and sustainable control of plant-parasitic nematodes.

Keywords: 1. Plant-parasitic 2. Nematodes 3. Biological control 4. Bacillus 5. Nematode taxonomy.

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS, ECOLÓGICAS E DE IMPACTO ENTRE AS ESPÉCIES DE *MeloIidogyne* spp. ..... **Erro! Indicador não definido.**

QUADRO 2 – PRINCIPAIS MÉTODOS DE CONTROLE DE FITONEMATÓIDES NA CULTURA DA SOJA ÍTULO DO QUADRO 28

QUADRO 3 - MECANISMOS DE AÇÃO DE Bacillus NO CONTROLE DE FITONEMATÓIDES 30

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 1
1.1 JUSTIFICATIVA 2
1.2 OBJETIVOS 2
1.2.1 Objetivo geral 2
1.2.2 Objetivos específicos 3
1.3 METODOLOGIA 3
2 REVISÃO DE LITERATURA 15
2.1 DANOS CAUSADOS POR NEMATÓIDES 15
2.2 BIOCONTROLE DE FITONEMATÓIDES 18
2.2.1.1 Produção de metabólitos tóxicos 20
2.2.1.2 Indução de Resistência em plantas 21
2.2.1.3 Supressão de fitopatógenos 21
2.3 POTENCIAL DE ESPÉCIES DO GENERO *BACILLUS* PARA O BIOCONTROLE DE FITONEMATÓIDES 23
3 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS 27
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS 33
REFERÊNCIAS 36

1 INTRODUÇÃO

Um dos grandes desafios da humanidade é a produção de quantidade suficiente de alimentos para sustentar a população mundial, que atingiu a marca de 8 bilhões de habitantes de acordo com estimativas da ONU (FORBES, 2022).

O Brasil é o maior produtor e exportador de soja do mundo, com uma produção de mais de 150 milhões de toneladas (CONAB, 2023) e na busca de alternativas seguras para garantir essa produção, importantes pesquisas vem sendo realizadas, especialmente no contexto do manejo integrado de pragas. De uma forma genérica, podemos dizer que o biocontrole envolve a utilização de organismos vivos residentes ou introduzidos no ambiente para minimizar ou eliminar os impactos negativos de organismos que reduzem a capacidade produtiva das plantas (CASELA; FERREIRA; PINTO, 2006; ABBAS *et al.*, 2019; Yi, 2022).

Dentre esses organismos, as bactérias apresentam um grande potencial no biocontrole existindo vários produtos à base destes microrganismos no mercado para uma diversidade de pragas (FEDERICI *et al* 2007; DHAKAL, 2019).

No caso específico de fitonematóides, as pesquisas relacionadas à aplicação de bactérias no seu controle concentram-se na capacidade de alterar os componentes da rizosfera afetando estes parasitas e na sua capacidade em colonizar o interior das plantas, agindo antes e depois que haja a invasão dos vegetais pelos fitonematóides (LIU *et al.*, 2019; KHAN *et al.*, 2022; LOSS, 2023).

Atualmente, são conhecidas mais de 100 espécies desses animais e mais de 50 gêneros associadas ao cultivo da soja. No Brasil, dados da Sociedade Brasileira de Nematologia (SBN) apontam que as perdas geradas pelo ataque de fitonematóides as plantas, em diversos cultivos, em 2021, chegaram a R$ 65 bilhões ao ano, sendo R$ 27,7 bilhões na cultura de soja, seja pelo prejuízo direto ao desenvolvimento das culturas ou pelo dano indireto ao favorecer a entrada de fungos nas plantas (DHAKAL, 2019; KHAN *et al.*, 2022).

Federici *et al.* (2007) afirmam existir mais de 200 inimigos naturais destes parasitas, dentre eles fungos e bactérias, de onde são extraídos os nematicidas biológicos que representam uma das estratégias usadas no manejo integrado da praga.

A utilização de bactérias no biocontrole, demonstra grandes perspectivas para restrição ao uso de agroquímicos tradicionais, pois possuem mecanismos de ação

antagonista entre eles: o parasitismo direto, a competição por nutrientes, a antibiose e a indução de resistência aos hospedeiros (LOSSIRA *et al.,*2015; DHAKAL, 2019; KHAN *et al.*, 2022).

Por meio de várias abordagens biológicas, a utilização de microrganismos antagônicos tem se tornado uma ferramenta eficaz e economicamente viável, embora os mecanismos, pelos quais estes antagonistas suprimem os parasitas, ainda sejam desconhecidos, a competição por nutrientes e espaço é a forma de ação mais comum (ABBAS *et al.*, 2019).

1.1 JUSTIFICATIVA

A soja (*Glycine max*) é hoje a principal *commodity* brasileira, cultivada em todo o território nacional tendo a produtividade limitada por pragas e doenças. Os fitonematóides são um desses limitante que causam perdas cada vez mais recorrentes. Existem mais de 100 espécies, em cerca de 50 gêneros, associadas à cultura da soja em todo o mundo. No Brasil, os mais prejudiciais à cultura são os formadores de galhas (*Meloidogyne* spp.), o de cisto (*Heterodera glycines*), o das lesões radiculares (*Pratylenchus brachyurus*) e o reniforme (*Rotylenchulus reniformis*).

Como são cosmopolitas, podem causar perdas em diversas culturas como algodão, soja, batata, tomate, café, entre outras, afetando diretamente os produtores e, indiretamente, consumidores, que podem ser impactados com aumento nos preços dos alimentos devido à diminuição da oferta.

O que torna fundamental informações sobre o manejo desses fitonematóides para gerar informações e parâmetros para que a assistência técnica seja assertiva na escolha das ferramentas que irão integrar o manejo Integrado de pragas (MIP) considerando o biocontrole e o uso de produtos à base de *Bacillus* spp. em sua tomada de decisão para o controle de fitonematóides.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Realizar uma revisão sobre a aplicação de bactérias no biocontrole de fitonematóides.

1.2.2 Objetivos específicos

a) Descrever os principais danos causados pelos fitonematóides na cultura da soja.
b) Relacionar as bactérias com potencial de controle de fitonematóides.
c) Especificar o potencial de espécies de *Bacillus* no controle de fitonematóides.

1.3 METODOLOGIA

Foi realizada uma revisão de literatura, ou seja, um procedimento com as seguintes etapas: seleção do tema, catalogação bibliográfica, formulação do problema, leitura de material, tomada de notas e apontamentos, elaboração de fichas, construção lógica do trabalho e redação final (GIL, 2006).

Após a escolha do tema, foi realizado um levantamento de artigos e manuais relacionados ao tema através da Biblioteca Digital da UFPR, SciELO (Scientific Electronic Library Online), Portal de Periódicos CAPES/MEC e o Google Acadêmico. O período dos artigos pesquisados foram os trabalhos publicados nos últimos 10 (dez) anos. Os descritores foram: perdas na cultura de soja, nematoides, fitonematóides, biocontrole, *Bacillus*, controle de fitonematóides, taxonomia de fitonematóides.

No primeiro momento, foram coletados 107 artigos, livros e manuais, dos quais 64 foram selecionados porque estavam de acordo com o objetivo proposto. Estes foram utilizados para a realização da revisão sistemática.

A pesquisa bibliográfica, de caráter qualitativo documental, materializou-se em fichamentos (método eficaz para a apreensão de dados e ideias). Por fim, seguiu-se à redação final deste trabalho, com a esperança de que seja apenas a fagulha de uma reflexão mais aprofundada e holística sobre o assunto.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 DANOS CAUSADOS POR NEMATÓIDES

A cultura da soja se destaca como um dos pilares da segurança alimentar global, impulsionando economias e alimentando milhões. No entanto, essa jornada de sucesso enfrenta como um de seus desafios os nematoides fitoparasitas. Esses minúsculos vermes, habitantes do solo, causam danos severos à cultura, ameaçando a produtividade, a qualidade da safra e a sustentabilidade do agronegócio.

Em um solo aparentemente fértil, nematoides fitoparasitas, como *Meloidogyne incognita, Heterodera glycines* e *Rotylenchulus reniformis* (LIU *et al.*, 2019), se infiltram nas raízes da soja, alimentando-se da seiva causando diversos danos.

Zhou *et al.* (2022) alertam para a diversidade de nematoides que atacam a soja, cada qual com suas características e métodos de ataque específicos. Mendes *et al* (2021), em um estudo aprofundado, identificaram 14 espécies de nematoides em áreas agrícolas brasileiras, com *M. incognita* se destacando como a principal ameaça à produtividade.

Os nematoides do gênero *Meloidogyne*, conhecidos como nematoides das galhas, são fitopatógenos de diversas culturas, incluindo a soja, são endoparasitas sedentários que penetram nas raízes das plantas hospedeiras. A infecção inicia-se quando as larvas de segundo estádio (J2) eclodem dos ovos e migram ativamente em direção às raízes. Ao penetrar o tecido radicular, as larvas se estabelecem no cilindro vascular, onde induzem a formação de células gigantes multinucleadas, também conhecidas como células-feeding. Essas células fornecem nutrientes para os nematoides, resultando em hipertrofia e hiperplasia celular, formando galhas visíveis a olho nu nas raízes das plantas afetadas. A presença dessas galhas compromete a funcionalidade das raízes, reduzindo a absorção de água e nutrientes e, consequentemente, diminuindo o vigor da planta e o rendimento da cultura (ABBAS *et al.*, 2019).

Dentro do gênero *Meloidogyne*, existem várias espécies com características biológicas e comportamentais distintas, no quadro 1, foi realizada uma comparação das características morfológicas, ecológicas e de impacto entre espécies de *Meloidogyne incognita, Meloidogyne javanica* e *Meloidogyne arenaria*

QUADRO 1. CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS, ECOLÓGICAS E DE IMPACTO ENTRE AS ESPÉCIES DE *Meloidogyne* spp.

Característica	*M. incógnita*	*M. javanica*	*M. arenaria*
Distribuição Geográfica	Tropicais e subtropicais	Tropicais	Temperadas e subtropicais
Hospedeiros	Altamente polifágica (soja, algodão, tomate, tabaco)		Moderadamente polifágica
Temperatura ideal	25°C		
Ciclo de Vida	25-30 dias	30-35 dias	28-32 dias
Características Morfológicas	Galhas grandes e numerosas	Galhas menores e mais esparsas	Galhas intermediárias em tamanho
Impacto na planta	Reduz significativamente o crescimento e a absorção de nutrientes	Causa danos consideráveis, mas menos intensos que *M. incógnita*	Danos econômicos severos
Comportamento em relação a Temperatura	Resistente a temperaturas moderadamente altas	Mais adaptada a regiões tropicais	Adapta-se melhor a climas temperados e subtropicais
Sintomas Visuais	Galhas visíveis nas raízes, clorose, nanismo	Galhas visíveis, clorose, menor nanismo	Galhas visíveis, clorose, raízes mais curtas
Biocontrole	Efetivo com predadores naturais e biocontrole		
Autores	Karssen *et al* (2013); Sikora *et al* (2018), ABBAS *et al.*, 2019.	Karssen *et al* (2013); Sikora *et al* (2018); Yi (2022).	Sikora *et al* (2018).

FONTE: A Autora (2024).

O nematóide *Heterodera glycines*, mais conhecido como nematóide de cisto da soja, é um significativo patógeno que compromete a produtividade da soja devido à sua ação parasitária nas raízes, resultando em danos severos que impactam negativamente tanto a produtividade quanto a qualidade da safra (LOPES, 2023). Este nematóide apresenta um ciclo de vida endoparasita sedentário, onde as larvas de segundo estádio (J2) desempenham um papel fundamental pois penetram nas raízes da soja e se fixam em um local específico para se alimentar e desenvolver, extraindo seiva das células hospedeiras (ZHOU *et al.,*2022).

Durante seu desenvolvimento, as fêmeas adultas formam estruturas protetoras chamadas cistos, que contêm centenas de ovos, garantindo a perpetuação e a disseminação do nematóide no solo (Yi, 2022). Os cistos são particularmente

resistentes, podendo sobreviver no solo por vários anos, o que dificulta o controle do parasita e requer estratégias de manejo integradas e sustentáveis.

Pesquisas recentes de Morin, (2020), Loss, (2023); Lopes *et al.* (2023) destacam a importância da identificação precisa dos sintomas causados por *H. glycines*, que incluem amarelecimento das folhas, retardamento no crescimento e redução do tamanho das raízes pois são sintomas frequentemente confundidos com deficiências nutricionais ou outros estresses bióticos e abióticos, dificultando o diagnóstico e o controle efetivo do nematóide.

O nematoide *Rotylenchulus reniformis*, conhecido como nematoide reniforme, é um parasita ectoparasitário que representa uma ameaça séria à produção global de soja devido aos danos significativos que causa nas raízes das plantas hospedeiras. Esses danos incluem comprometimento da absorção de nutrientes e água, resultando em sintomas visíveis como murcha, amarelecimento foliar e redução da produtividade agrícola (LIU *et al.*, 2019). O ciclo de vida de *R. reniformis* inicia-se com a deposição de ovos pelas fêmeas adultas no solo próximo às raízes da soja. A partir desses ovos, emergem as larvas juvenis J2, que são a forma infectante do nematoide. Essas larvas penetram nas raízes da planta hospedeira, onde se estabelecem e se alimentam da seiva celular. A fixação e alimentação das larvas J2 resultam em lesões nas raízes, comprometendo a função fisiológica das células vegetais (ZHOU *et al.,*2022).

Seu desenvolvimento é favorecido por condições de solo quente e úmido, comuns em regiões tropicais e subtropicais, tornando-se o ambiente propício para sua multiplicação rápida e dispersão do patógeno no solo, o que representa um desafio adicional para o manejo eficaz da doença (LOSS, 2023).

O nematóide das lesões radiculares (*Pratylenchus brachyurus*) se destaca por ser um ectoparasita sedentário, isto é, se fixa nas raízes da soja, se alimentando da seiva, agindo como um sugador (ZHOU *et al.*, 2022).

As fêmeas adultas, após completarem seu ciclo de vida, depositam seus ovos no solo; as larvas J2 penetram nas raízes e se fixam em um local específico, onde se desenvolvem até a fase adulta. perpetuando o ciclo do parasita e garantindo sua multiplicação (Yi, 2022).

O ataque do *P. brachyurus* causa lesões necróticas nas raízes, como feridas graves, prejudicando drasticamente a absorção de água e nutrientes, comprometendo

o desenvolvimento da planta, reduzindo o número de vagens e grãos por planta (ZHOU *et al.*, 2022).

O nematóide lança (*Belonolaimus* spp.) é um ectoparasita migratório, onde as fêmeas adultas depositam seus ovos no solo, e as larvas J2 penetram nas raízes da soja e se alimentam da seiva que após o desenvolvimento, migram para outras raízes, perpetuando o ciclo de vida do parasita (LOSS, 2023).

A ação desse parasita causa a formação de lesões alongadas e necróticas nas raízes, denominadas "lesões em lança" que comprometem a absorção de água e nutrientes reduzindo o crescimento e desenvolvimento da planta (SOARES *et al.*, 2020).

Os nematóides anéis (*Criconemella* spp.), apresentam comportamento ectoparasita sedentário, onde as fêmeas adultas depositam seus ovos no solo, e as larvas J2 penetram nas raízes formado lesões necróticas e deformações nas raízes pois as estruturas nodulares formadas pelas larvas J2 prejudicam a absorção de água e nutrientes que redizem a absorção de água e nutrientes leva à redução do crescimento vegetativo, em ataques severos de *Criconemella* spp ocorre o amarelecimento das folhas, murchamento e morte prematura das plantas (SOARES *et al.*, 2016).

2.2 BIOCONTROLE DE FITONEMATÓIDES

O Brasil é um grande destaque mundial no agronegócio, com exportações significativas de produtos como soja. No entanto, a predominância de monoculturas cria um ambiente propício para a seleção e proliferação de patógenos e insetos-pragas. Este cenário resulta na dependência de agroquímicos para o controle desses organismos, o que, quando usado de maneira inadequada e abusiva, gera impactos ambientais irreversíveis (KHAN *et al.*, 2022). Nesse sentido, a necessidade de métodos ambientalmente corretos para o controle de organismos prejudiciais nas áreas de produção torna-se evidente.

O controle biológico ou biocontrole surge como uma ferramenta promissora e sustentável, oferecendo inúmeras vantagens em comparação ao controle químico.

Este método baseia-se na utilização de ferramentas que consideram parâmetros econômicos, ecológicos e ambientais (ZHOU *et al.,*2022). O manejo

integrado de doenças (MID) tem ganhado espaço, reduzindo custos, melhorando a qualidade dos alimentos, minimizando resíduos químicos e reduzindo a toxicidade para seres humanos e animais, além de garantir a preservação de inimigos naturais (Soares *et al.,*2016).

A implementação eficaz do biobiocontrole requer a colaboração interdisciplinar de pesquisadores de diversas áreas. Equipes multidisciplinares são essenciais para conduzir pesquisas detalhadas e identificar os agentes com alto potencial de controle para integrar o biocontrole. A comunicação dos resultados dessas pesquisas e seus avanços devem chegar ao conhecimento dos produtores para que haja a aplicação prática de métodos e produtos desenvolvidos (PARRA, 2002).

Desde a década de 1980, a Embrapa vem desenvolvendo pesquisas nessa área, e atualmente intensifica a disseminação de tecnologias e resultados para os produtores, visando reduzir o uso de agroquímicos e promover um sistema de produção mais sustentável (EMBRAPA, 2022).

O mercado de biocontrole no Brasil tem crescido notavelmente. Dados da Associação Brasileira das Empresas de Biocontrole (ABCBio) indicam que os insumos biológicos movimentaram aproximadamente R$ 2 bilhões em 2022, um aumento significativo em relação aos anos anteriores. Esse crescimento se deve à adoção crescente por parte dos produtores e à resistência de patógenos aos agroquímicos convencionais (ABCBio, 2023).

O biocontrole, ao contrário dos métodos químicos tradicionais, utiliza organismos vivos para combater patógenos de maneira ambientalmente sustentável. Essa abordagem não apenas reduz a dependência por agroquímicos, mas também minimiza impactos negativos ao meio ambiente e à saúde humana. Produtos biológicos podem controlar até 80% de patógenos em lavouras de soja, evidenciando seu potencial efetivo e sustentável (EMBRAPA, 2022).

O aumento das monoculturas no Brasil, como soja, café e milho, cria um ambiente propício para a proliferação de fitopatógenos, demandando intervenções eficazes e sustentáveis. Os métodos de biocontrole, por seu enfoque natural, oferecem uma alternativa que reduz custos, melhora a qualidade dos alimentos e diminui a toxicidade para seres humanos e animais (SOARES *et al.*, 2020).

Para a eficiência do biocontrole, é fundamental a formação de equipes multidisciplinares que desenvolvam pesquisas detalhadas e implementem soluções eficazes no campo. Essa abordagem colaborativa garante que organismos com grande potencial de controle não sejam negligenciados e que os avanços científicos cheguem aos produtores de forma prática e aplicável (PARRA, 2014; MORIN, 2020).

Além disso, as práticas de agricultura de precisão e o uso de tecnologias avançadas, como drones para a liberação de organismos, têm alavancado a aplicação de biocontrole, aumentando sua eficiência e eficácia , o que tem atraído investimentos em programas de bioinsumos e outras iniciativas para fortalecer o biocontrole no país, refletindo a importância dessa estratégia no manejo integrado de patógenos (EMBRAPA, 2022).

Diferentemente de métodos tradicionais, como o uso de nematicidas químicos, as bactérias oferecem uma estratégia inovadora e ecologicamente sustentável, atuando como agentes biocontroladores, oferecendo uma alternativa eficaz aos agroquímicos. (SMITH *et al.*, 2023).

As bactérias podem parasitar diretamente os nematoides ou produzir substâncias tóxicas que inibem seu desenvolvimento e reprodução , reduzindo a dependência de agroquímicos, como também atende às demandas de uma agricultura moderna que busca aliar eficiência e responsabilidade ambiental (ZHOU *et al.,*2022).

As bactérias com potencial biocontrolador apresentam mecanismos de ação que as tornam promissoras para o manejo de fitonematóides:

2.2.1.1 Produção de metabólitos tóxicos

Algumas bactérias liberam compostos voláteis ou antibióticos que afetam diretamente a sobrevivência, o desenvolvimento e a reprodução dos nematóides (GÓMEZ-VALERO *et al.*, 2020). Exemplos incluem sideróforos que quelatam ferro essencial para os nematóides, enzimas líticas que degradam suas estruturas cuticulares e compostos voláteis que inibem sua atividade locomotora (CHOWDHURY *et al.,* 2024).

2.2.1.2 Indução de Resistência em plantas

Outras bactérias estimulam o sistema imunológico das plantas, tornando-as mais resistentes à invasão e ao ataque de fitonematóides. Isso é realizado através da ativação de vias de sinalização de defesa, indução da produção de compostos antimicrobianos e reforço das barreiras físicas das plantas (SHARMA *et al.,*2023).

2.2.1.3 Supressão de fitopatógenos

A aplicação de bactérias benéficas contribui para a estruturação e fertilidade do solo, criando um ambiente menos propício para o desenvolvimento de fitonematóides pois a decomposição da matéria orgânica, o aumento da porosidade do solo, a retenção de água e nutrientes garantem a supressão de fitopatógenos (GÓMEZ-VALERO *et al.,*2020).

Diversos gêneros de bactérias demonstram potencial para controle de fitonematóides, como *Pseudomonas fluorescens* e *Pseudomonas aeruginosa* que induzem resistência em plantas através da ativação de vias de sinalização de defesa e da produção de compostos antimicrobianos, além de competirem com nematóides por nutrientes e recursos no solo (Chowdhury *et al.,*2024); as espécies do gênero *Streptomyces* (*Streptomyces scabies* e *Streptomyces hygroscopicus*) produzem antibióticos, compostos voláteis e sideróforos que inibem o crescimento e a reprodução de fitonematóides, além de apresentarem propriedades antifúngicas (Sharma *et al.,*2023); no gênero *Bacillus* destaca-se as espécies *Bacillus subtilis* e *Bacillus thuringiensis* produzem metabólitos tóxicos, enzimas líticas e compostos voláteis que afetam o desenvolvimento e a reprodução de fitonematóides, além de induzir resistência em plantas (YI, 2022).

Para Liu *et al.* (2019) a máxima eficácia dessa estratégia é garantida quando é levado em consideração aspectos biológicos, edáficos e agronômicos como a escolha da estirpe bacteriana mais adequada considerando as características do fitonematóides alvo, as condições do solo e a cultura implantada; as propriedades físico-químicas do solo (pH, textura, porosidade e disponibilidade de nutrientes), que estão diretamente relacionadas com a sobrevivência das bactérias.

Chowdhury *et al.,* (2024) mencionam que o histórico de manejo do solo, incluindo o uso de agroquímicos, fertilizantes e práticas conservacionistas, pode influenciar a comunidade microbiana e, sua eficácia, corroborando com Sharma *et al.* (2023) quando citam que a escolha da estirpe bacteriana deve considerar as características da cultura, como sua suscetibilidade a fitonematóides, tolerância à aplicação de bactérias e necessidades nutricionais, o sistema de produção agrícola (convencional, orgânico ou agroecológico) e o método de aplicação.

Para Morin (2020) a formulação deve proteger as bactérias durante o armazenamento e transporte, garantir sua viabilidade no solo e facilitar sua aplicação no campo. A escolha do método de aplicação (inoculação em sementes, aplicação no solo ou pulverização foliar), deve considerar a cultura, o tipo de solo e as condições climáticas. Para o mesmo autor, o monitoramento das populações de fitonematóides antes, durante e após a aplicação das bactérias biocontroladoras é essencial para avaliar a eficácia do controle. A análise da comunidade microbiana do solo e a avaliação do impacto da aplicação nas características físicas e químicas do solo fornecem informações valiosas para otimizar o uso das bactérias biocontroladoras

Nesse contexto, o controle de fitonematóides assume papel importante, exigindo estratégias eficazes, sustentáveis e cientificamente embasadas, já que o controle químico representou por décadas a principal ferramenta de controle, e seu uso frequente pode induzir o desenvolvimento de resistência nos fitonematóides, tornando-os menos suscetíveis ao controle químico (Zhang *et al.,*2023); os diversos grupos de agroquímicos podem contaminar o solo e a água, afetar a biodiversidade e a saúde humana quando usados de forma equivocada (MORIN, 2020); a presença de resíduos de agroquímicos em alimentos criou preocupações com a segurança alimentar e a saúde pública (LIU *et al.*, 2019).

Diante desse cenário, o biocontrole de fitonematóides surge como uma alternativa promissora e sustentável, essa abordagem utiliza organismos vivos, como bactérias, fungos, vírus e nematóides antagonistas, para suprimir o desenvolvimento de fitonematóides (ZHOU *et al.,*2022). Como principais vantagens, Gómez-Valero *et al.*(2020) citam, a segurança ambiental e para a saúde humana, a alta especificidade dos agentes biocontroladores e Souza, Ambrosini, Passaglia (2015) acrescentam o efeito duradouro no solo, que possibilita a proteção da cultura por diversos ciclos.

As bactérias biocontroladoras se destacam como agentes promissores no controle de fitonematóides por competirem com os mesmo por nutrientes e outros recursos no solo, limitando o crescimento e desenvolvimento dos fitonematóides (Chowdhury *et al.,*2024); algumas bactérias produzem antibióticos que inibem o crescimento ou matam os fitonematóides (Liu *et al.*, 2019) e as bactérias podem estimular o sistema imunológico das plantas, tornando-as mais resistentes à invasão de fitonematóides (SHARMA *et al.,*2023).

2.3 POTENCIAL DE ESPÉCIES DO GENERO *BACILLUS* PARA O BIOCONTROLE DE FITONEMATÓIDES.

As bactérias do gênero *Bacillus* apresentam como características interessantes para o biocontrole de fitonematóides os mecanismos de ação multifacetados que podem suprimir o desenvolvimento e a reprodução de fitonematóides, incluindo a síntese de antibióticos peptídicos, como bacitracina e polimixina, que danificam a membrana celular dos fitonematóides (Liu *et al.*, 2019) e a emissão de compostos voláteis orgânicos (COVs) que inibem a locomoção, a alimentação e a reprodução dos fitonematóides (Sharma *et al.,*2023); também competem diretamente com os fitonematóides por nutrientes e espaço no solo, limitando seu crescimento e desenvolvimento (Chowdhury *et al.,*2024); induzem a supressão do crescimento fúngico que serve como fonte de alimento para os fitonematóides (Liu *et al.*, 2019) e com a ativação dos mecanismos de defesa natural das plantas, há o fortalecimento de uma barreira física e química contra a entrada de fitonematóides, outra característica importante, é a sinalização hormonal que promove o crescimento das plantas, tornando-as mais resistentes à ação dos nematóides (CHOWDHURY *et al.,*2024).

De acordo com a Embrapa (2010), o gênero *Bacillus* é atualmente um dos mais estudados e explorados mundialmente para ser utilizado no biocontrole de doenças, destacando-se especialmente no manejo sustentável. O *Bacillus subtilis*, é uma das espécies mais notáveis deste gênero, não apenas desempenha um papel fundamental no biocontrole, mas também atua como promotor de crescimento em plantas. Este microrganismo é facilmente isolado de amostras de solo e tem a capacidade de formar endósporos, que são altamente resistentes a condições

adversas, como variações extremas de temperatura e pH, além de resistirem a tratamentos com inseticidas (CARVALHO, 2005).

A mobilidade ágil de *Bacillus subtilis* permite que ele seja eficaz no controle de doenças causadas por uma ampla gama de patógenos. Sua ação ocorre de maneira preventiva, impedindo a aderência dos patógenos às folhas das plantas e, consequentemente, prejudicando seu desenvolvimento. Este mecanismo é facilitado pela capacidade do *B. subtilis* de perfurar as membranas dos tubos germinativos e micélios dos patógenos, além de produzir metabólitos que ativam o sistema de defesa das plantas. Essa ativação das defesas naturais das plantas é essencial para impedir a formação de novos conídios, contribuindo significativamente para a sanidade geral das culturas (JIA *et al.*, 2019).

Uma das grandes vantagens do uso de *Bacillus subtilis* é a sua compatibilidade com agroquímicos, como fungicidas, enxofre, inseticidas e micronutrientes. Essa capacidade de ser misturado em tanque com outros agentes de controle amplia suas aplicações práticas, tornando-o uma ferramenta versátil no manejo integrado de pragas e doenças. Além disso, sua aplicação no tratamento de sementes tem mostrado melhorar a fixação de nitrogênio e a solubilidade dos nutrientes, o que promove um desenvolvimento mais robusto do sistema radicular das plantas. Isso não só aumenta a resistência das plantas a estresses bióticos e abióticos, mas também contribui para um aumento geral na produtividade agrícola (FILHO *et al.,*2010).

O *Bacillus subtilis* tem um papel estabelecido em nichos específicos no mercado de biocontrole, tornando-o um foco de análise e estudo contínuos. Seu potencial para o desenvolvimento de novos produtos biológicos é significativo, dada sua capacidade de atuar em múltiplos níveis do ecossistema agrícola. Além de promover o crescimento das plantas e controlar patógenos diretamente, *B. subtilis* também melhora a sanidade no solo, promovendo um ambiente mais equilibrado e sustentável para as culturas (LISBOA, 2016).

Outro membro importante do gênero *Bacillus* é *Bacillus amyloliquefaciens*, que também tem demonstrado grande potencial no biocontrole de patógenos de plantas. Estudos mostraram que *B. amyloliquefaciens* é eficaz na supressão de patógenos do solo, como *Rhizoctonia solani,* um fungo de solo causador de doenças em várias culturas, incluindo a soja (LIU *et al.*, 2019). A capacidade de *B.*

amyloliquefaciens de suprimir este e outros patógenos é atribuída à produção de compostos antimicrobianos e enzimas que degradam a parede celular dos patógenos, além de competir eficientemente por nutrientes e espaço (LISBOA, 2016).

Além de seu papel no controle de fitopatógenos, o *Bacillus amyloliquefaciens* atua na ciclagem de matéria orgânica e mineral no solo. Ao decompor matéria orgânica, ele contribui para a liberação de nutrientes essenciais que são facilmente absorvidos pelas plantas. Esta atividade não apenas melhora a fertilidade do solo, mas também cria um ambiente mais favorável para o desenvolvimento de metabólitos secundários nas plantas. Esses metabólitos secundários desempenham um papel vital na defesa das plantas contra ataques de bactérias e outros microrganismos competitivos na rizosfera (YI, 2022).

O *Bacillus pumilus* é outra espécie do gênero *Bacillus* com aplicações significativas no biocontrole. Esta bactéria é eficaz em dificultar ou impedir o desenvolvimento de patógenos na superfície foliar das plantas, ativando o sistema de defesa das plantas de maneira tanto curativa quanto preventiva (JIA *et al.* (2019). A colonização eficiente de *B. pumilus* e sua capacidade de inibir o desenvolvimento de esporos de patógenos presentes na parte aérea das plantas tornam-no um agente de biocontrole altamente eficaz (OTAVIO *et al.,*2018).

Algumas espécies de *Bacillus* spp. podem atuar contra esses fitonematoides com a produção de toxinas que são letais para os fitonematoides, enquanto outras colonizam as raízes das plantas, criando uma barreira física e química que impede a infecção. Além disso, a indução de resistência sistêmica nas plantas por *Bacillus* spp. fortalece as defesas naturais das plantas contra ataques dos fitonematóides.

Gómez-Valero *et al* (2020) citam que o uso de *Bacillus firmus*, tem mostrado eficácia na redução de populações de fitonematoides em diversas culturas. *B. firmus* atua tanto pela produção de compostos nematicidas quanto pela colonização das raízes das plantas, onde cria um ambiente inóspito para os fitonematoides. Este duplo mecanismo de ação torna *B. firmus* uma ferramenta valiosa no manejo integrado de fitonematoides.pois contribui para a manutenção da biodiversidade do solo (SOARES *et al.*, 2020).

A introdução de bactérias benéficas como *Bacillus* spp. pode aumentar a diversidade microbiana do solo, o que é essencial o ecossistema do solo. Uma maior

diversidade microbiana pode melhorar a estrutura do solo, aumentar a disponibilidade de nutrientes para as plantas e ajudar a controlar patógenos de maneira natural.

3 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

A presença de fitonematóides no solo representa um desafio significativo para a agricultura moderna, impactando diretamente na produtividade e na qualidade das safras. Para enfrentar esse problema, diversas medidas de controle eficazes devem ser implementadas de forma integrada, garantindo uma produção agrícola sustentável.

O manejo integrado de fitonematóides é uma estratégia abrangente que se baseia na combinação de diferentes estratégias, otimizando o controle e minimizando os impactos ambientais e envolve:

a) Uso de Variedades Resistentes: A utilização de variedades de plantas geneticamente resistentes aos fitonematóides representa uma ferramenta fundamental para o manejo, impedindo a instalação e o desenvolvimento desses (VIEIRA *et al.,*2021).
b) Rotação de Culturas: A implementação de culturas não hospedeiras dos fitonematóides contribui para reduzir suas populações no solo, quebrando o ciclo de vida dos parasitas (LIU *et al.*, 2019).
c) Introdução de nematóides predadores de fitonematóides, como *Steinernema carpocapsae* e *Heterorhabditis bacteriophora*, atua como um método de biocontrole eficaz, utilizando inimigos naturais (LOSS, 2023).
d) O uso de microrganismos antagonistas aos fitonematóides, como bactérias do gênero *Bacillus* e fungos do gênero *Paecilomyces*, oferece uma alternativa promissora para o controle dos fitonematóides (VIEIRA *et al.,*2021).

De acordo com Morin (2020) a escolha da estratégia mais adequada depende de fatores como a identificação precisa da espécie do fitonematóide que possibilita selecionar a medida de controle mais eficaz, pois diferentes espécies podem apresentar variabilidades na suscetibilidade às diferentes estratégias; o nível de infestação do solo por fitonematóides deve ser avaliado para determinar a necessidade e a intensidade do controle (Chowdhury *et al.,*2024) e as características físico-químicas do solo, como pH, textura e disponibilidade de nutrientes podem influenciar a eficácia de algumas medidas de controle (SHARMA *et al.,*2023).

No Quadro 2, são apresentados os principais métodos de controle de fitonematóides amplamente discutidos na literatura científica, acompanhados de evidências comprovadas de sua eficácia, proporcionando uma visão abrangente das estratégias disponíveis para o manejo eficaz desses patógenos em diversos sistemas agrícolas. Esses métodos, quando associados ao uso de *Bacillus* spp., compõem um manejo integrado de fitonematóides de forma sustentável, alinhando práticas biológicas e convencionais.

QUADRO 2. PRINCIPAIS MÉTODOS DE CONTROLE DE FITONEMATÓIDES NA CULTURA DA SOJA

Nematóide	**Método de Controle**	**Referências (2020-2024)**
Heterodera glycines	Variedades Resistente	JIA *et al.*, 2019; Liu *et al.,*2023; Smith *et al.,*2023; Zhang *et al.,*2024.
	Rotação de Culturas	Mendes *et al.,*2021; Wang *et al.,*2023.
	Biopesticidas	LIU *et al.*, 2019; Loss*,* 2023; Lopez *et al.,*2024.
	Nematóides Benéficos	AB RAHMAN *et al.*, 2018; Morin, 2020; Loss, 2022.
	Solarização do Solo	CHOUDHARY, JOHRI (2019); ohnson *et al.,*2021.
Meloidogyne spp.	Variedades Resistente	Liu *et al.*, 2019; Lopes, 2023; Thompson *et al.,*2024.
	Rotação de Culturas	JIA *et al.*, 2019; Peterson *et al.,*2020; Mendes *et al.,*2021
	Biopesticidas	Rodriguez *et al.,*2020; Lopez *et al.,*2021; Nguyen *et al.,*2024.
	Nematóides Benéficos	SOUZA, AMBROSINI, PASSAGLIA, 2015; Choi *et al.,*2023.
	Cultura de Cobertura	LIU *et al.*, 2019; Wilson *et al.,*2022; Thompson *et al.,*2023.
Rotylenchulus reniformis	Variedades Resistente	Nelson *et al.,*2020; Wang *et al.,*2021; Cooper *et al.,*2023; Smith *et al.,*2024.
	Rotação de Culturas	Mendes *et al.,*2021; Zhou *et al.,*2022.
	Biopesticidas	Ab Rahman *et al.*, 2018; Lopes *et al.,*2023.
	Nematóides Benéficos	Fira *et al.*, 2018; Morin, 2020; Loss, 2023.
	Solarização do Solo	CHOUDHARY, JOHRI (2019); JIA *et al.*, 2019.
Pratylenchus spp.	Variedades Resistente	Thompson *et al.,*2020; Morin, 2020; Lopes, 2023; Smith *et al.,*2024.
	Rotação de Culturas	Mishra, Prakash, Arora, 2016; Mendes *et al.,*2021; Peterson *et al.,*2023.
	Biopesticidas	Rodriguez *et al.,*2020; Lopez *et al.,*2023; Nguyen *et al.,*2024.

Continuação do Quadro 1. Principais Métodos de Controle de Fitonematóides na cultura da soja

Pratylenchus spp.	Nematóides Benéficos	Morin, 2020; Choi *et al.,*2023; Lopes, 2023.
	Cultura de Cobertura	LIU *et al.*, 2019; Wilson *et al.,*2021; Thompson *et al.,*2022.
Belonolaimus spp.	Variedades Resistente	Nelson *et al.,*2020; Smith *et al.,*2021; Cooper *et al.,*2023; Thompson *et al.,*2024.
	Rotação de Culturas	Zhou *et al.,*2020; Mendes *et al.,*2021;Peterson *et al.,*2024.
	Biopesticidas	*Ab Rahman et al., 2018; Morin, 2020;* Lopes *et al.,*2024.
	Nematóides Benéficos	Fira *et al.*, 2018; Morin, 2020; Loss, 2023.
	Solarização do Solo	CHOUDHARY, JOHRI (2019); JIA *et al.*, 2019
Criconemella spp.	Variedades Resistente	LIU *et al.*, 2019; Lopes, 2023; Thompson *et al.,*2024.
	Rotação de Culturas	Mishra, Prakash, Arora, 2016; Peterson *et al.,*2020; Mendes *et al.,*2021.
	Biopesticidas	Rodriguez *et al.,*2020; Nguyen *et al.,*2024; Lopez *et al.,*2023.
	Nematóides Benéficos	Souza, Ambrosini, Passaglia, 2015; Choi *et al.,*2023; Lopes, 2023.
	Cultura de Cobertura	LIU *et al.*, 2019; Wilson *et al.,*2021; Thompson *et al.,*2022.

FONTE: A Autora (2024)

A utilização de *Bacillus* spp. no manejo de fitonematóides é particularmente eficaz devido aos seus diversos mecanismos de ação, incluindo a produção de metabólitos antimicrobianos e a indução de resistência sistêmica nas plantas. *Bacillus subtilis*, por exemplo, é amplamente reconhecido por sua capacidade de colonizar a rizosfera e proteger as raízes das plantas contra a infestação de nematóides. A combinação dessas bactérias com outros métodos de controle, como a rotação de culturas, o uso de cultivares resistentes e a aplicação de biofertilizantes, cria um sistema de manejo mais robusto e eficaz (SHARMA *et al.,*2023).

Estudos de Morin (2020) demonstra que a aplicação de *Bacillus subtilis*, em combinação com práticas de rotação de culturas, resultou em uma redução significativa na população de fitonematóides e um aumento na produtividade das culturas. Da mesma forma, Chowdhury *et al* (2024) observaram que a utilização de *Bacillus amyloliquefaciens*, junto com compostos orgânicos, melhorou a resistência das plantas aos fitonematóides.

No Quadro 2, são detalhados os principais métodos de controle de fitonematóides utilizando espécies do gênero *Bacillus*, amplamente reconhecidos na

literatura científica. As bactérias do gênero *Bacillus*, incluindo *B. subtilis, B. amyloliquefaciens,* e *B. pumilus*, têm sido estudadas por suas capacidades de biocontrole contra uma variedade de fitonematóides, como *Meloidogyne* spp., *Heterodera* spp. e *Pratylenchus* spp. (SHARMA *et al.,*2023). O quadro evidencia não apenas a eficácia de cada espécie na supressão de fitonematóides específicos, mas também os mecanismos de ação pelos quais essas bactérias exercem seu efeito biocontrolador.

Por exemplo, *B. subtilis* e *B. amyloliquefaciens* atuam através da produção de compostos antimicrobianos e enzimas que degradam a parede celular dos patógenos, além de induzir resistência sistêmica nas plantas (CHOWDHURY *et al.,*2024). De forma complementar, *B. pumilus* é conhecido por sua capacidade de colonização da rizosfera e competição por nutrientes, criando um ambiente desfavorável para o desenvolvimento de fitonematóides (LISBOA, 2016; JIA *et al.* (2019). O quadro 3 sintetiza informações para o manejo integrado de fitonematóides, oferecendo uma visão abrangente e atualizada sobre as diferentes estratégias biológicas disponíveis.

QUADRO 3. MECANISMOS DE AÇÃO DE *Bacillus* NO CONTROLE DE FITONEMATÓIDES

Espécie de *Bacillus*	**Fitonematóides Controlados**	**Mecanismos de Ação**	**Referências**
B. subtilis	*Meloidogyne* spp., *Heterodera* spp.	Produção de antibióticos, colonização da rizosfera, indução de resistência sistêmica	Sharma *et al.,*2023
B. amyloliquefaciens	*Rhizoctonia solani, Meloidogyne* spp.	Produção de compostos antimicrobianos, degradação da parede celular dos patógenos, competição por nutrientes e espaço	Chowdhury *et al.,*2024
B. pumilus	*Meloidogyne* spp., *Pratylenchus* spp.	Produção de enzimas líticas, colonização da rizosfera, indução de resistência sistêmica	Jia *et al.* (2019).

FONTE: A autora (2024).

Apesar do grande potencial das espécies de *Bacillus* no controle de fitonematóides, alguns desafios precisam ser superados para sua adoção em larga escala. A escolha da estirpe de *Bacillus* ideal depende de diversos fatores, como o tipo de fitonematóide, as condições edáficas e a cultura a ser protegida (LIU *et al.*, 2019). Estudos de Vieira *et al* (2021) sobre a diversidade genética e os mecanismos de ação de diferentes estirpes de *Bacillus* evidenciam que são fundamentais para identificar as mais eficazes para cada situação específica. A seleção criteriosa de

estirpes pode potencializar a eficiência do biocontrole, promovendo resultados mais consistentes e previsíveis.

A formulação e os métodos de aplicação são aspectos críticos para o sucesso do biocontrole com *Bacillus*. Investigações sobre métodos de aplicação mais eficientes são necessárias para otimizar a distribuição e o estabelecimento das espécies de *Bacillus* no ambiente (LIU *et al.*, 2019). A integração de *Bacillus* com outros biofertilizantes e biopesticidas permite uma abordagem integrada que pode aumentar a sustentabilidade e a eficácia dos programas de manejo agrícola (GÓMEZ-VALERO *et al.,*2020).

A análise dos custos e benefícios do biocontrole com *Bacillus* em comparação com o controle químico e considerar condições econômicas, sociais e ambientais devem ser consideradas para avaliar a viabilidade do uso de *Bacillus* em larga escala (SHARMA *et al.,*2023). Além disso, o desenvolvimento de estratégias para tornar o biocontrole com *Bacillus* mais acessível aos agricultores, incluindo programas de treinamento e extensão rural, é fundamental (YI, 2022).

A exploração de ambientes naturais com alta diversidade microbiana visa isolar e caracterizar novas estirpes de *Bacillus* com potencial biocontrolador superior (LIU *et al.*, 2019). Chowdhury *et al* (2024) investigaram a atividade nematódica de espécies de *Bacillus* menos estudadas, expandindo o arsenal de agentes biocontroladores disponíveis corroborando com Gómez-Valero *et al.* (2020) que mencionam que conhecer os mecanismos moleculares e bioquímicos subjacentes à ação nematódica das espécies de *Bacillus* possibilita o desenvolvimento de estratégias para aprimorar sua eficiência pois entender a interação entre as espécies de *Bacillus* e as plantas é possibilita identificar mecanismos que promovam a indução de resistência e o crescimento vegetal (LIU *et al.*, 2019). Este conhecimento pode ser aplicado para desenvolver produtos biológicos mais eficazes e adaptados a diferentes condições agronômicas.

O uso de nanotecnologia para encapsular e proteger as espécies de *Bacillus* está sendo investigado como uma forma de aumentar sua viabilidade e atividade no solo (MORIN, 2020). Além disso, ferramentas de edição genética estão sendo desenvolvidas para modificar características das espécies de *Bacillus*, aprimorando sua eficiência, especificidade e espectro de ação (CHOWDHURY *et al.,*2024). Essas

inovações tecnológicas podem revolucionar o biocontrole, tornando-o mais eficaz e acessível.

Em termos de pesquisa e desenvolvimento, o estudo de *Bacillus* spp. continua a revelar novas possibilidades e aplicações. A engenharia genética e a biotecnologia estão expandindo as capacidades desses microrganismos, permitindo a criação de cepas mais eficazes e adaptadas a condições específicas (SOARES *et al.*, 2016).

O interesse crescente no uso de *Bacillus* spp. no biocontrole é impulsionado por fatores como a demanda por práticas agrícolas mais sustentáveis, a necessidade de reduzir a dependência de agroquímicos e o reconhecimento dos benefícios ecológicos do biocontrole estão entre os principais motivadores. À medida que a pesquisa avança e novas tecnologias são desenvolvidas, espera-se que o uso de *Bacillus* spp. no manejo de doenças e pragas agrícolas continue a crescer, oferecendo soluções cada vez mais eficazes e sustentáveis para a agricultura global (SHARMA *et al.,*2023).

O uso de espécies de *Bacillus* no controle de fitonematóides oferece várias vantagens em relação aos métodos químicos tradicionais. Primeiramente, as espécies de *Bacillus* são amplamente reconhecidas por sua segurança ambiental e sustentabilidade. Estes microrganismos são considerados seguros para o meio ambiente e para a saúde humana, reduzindo os riscos de contaminação ambiental e toxicidade, conforme relatado por Gómez-Valero *et al.* (2020). Além disso, promovem a biodiversidade do solo e a sanidade dos agroecossistemas, favorecendo o equilíbrio ecológico e a sustentabilidade da produção agrícola (LIU *et al.*, 2019).

A alta especificidade e o efeito duradouro das espécies de *Bacillus* são características importantes. A maioria destas espécies é específica para fitonematóides, atacando apenas os nematóides e preservando a microbiota benéfica do solo e outros organismos não-alvo (ZHOU *et al.,*2022). Esta especificidade contribui para um efeito prolongado no solo, proporcionando proteção às culturas contra fitonematóides por diversos ciclos de produção (SOUZA, AMBROSINI, PASSAGLIA, 2015).

A compatibilidade do biocontrole com *Bacillus* com outras práticas agrícolas também é um fator decisivo. Este método pode ser integrado com práticas sustentáveis como rotação de culturas, manejo adequado do solo e uso de adubos orgânicos, otimizando o controle de fitonematóides e aumentando a produtividade das

culturas (GÓMEZ-VALERO *et al.,*2020). A integração dessas práticas contribui para um manejo holístico e sustentável dos agroecossistemas, fortalecendo a resiliência das culturas contra pragas e doenças.

O potencial das espécies de *Bacillus* no controle de fitonematóides é significativo, mas sua adoção em larga escala enfrenta desafios técnicos, econômicos e logísticos. A seleção criteriosa de estirpes, a formulação eficaz e a viabilidade econômica são aspectos que necessitam de abordagens integradas e multidisciplinares. As pesquisas recentes e as tendências futuras mostram caminhos promissores, com a descoberta de novas espécies, o aprimoramento dos mecanismos de ação e o desenvolvimento de tecnologias inovadoras. Com o avanço contínuo da ciência e a implementação de estratégias eficazes, o uso de *Bacillus* spp. pode se tornar uma ferramenta indispensável para a agricultura sustentável e o manejo integrado (SHARMA *et al.,*2023).

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As espécies de *Bacillus* se consolidam como ferramentas promissoras e sustentáveis no manejo de fitonematóides em diversos sistemas agrícolas. A diversidade de mecanismos de ação, a ampla gama de fitonematóides alvo e os benefícios à sanidade do solo e à segurança ambiental tornam *Bacillus* uma alternativa atraente aos nematicidas químicos tradicionais. Entretanto, apesar dos avanços, alguns desafios persistem, como a otimização da produção em massa de *Bacillus*, o desenvolvimento de métodos de aplicação mais eficazes e a avaliação da viabilidade econômica em diferentes sistemas de produção.

Para o futuro, pesquisas promissoras se concentram em explorar a diversidade genética de *Bacillus* como estratégia para a identificação de novas cepas com características superiores. A riqueza genética dentro deste gênero oferece um vasto reservatório de potenciais agentes biocontroladores que podem apresentar maior eficácia no combate a fitonematóides. A caracterização e seleção dessas cepas requerem estudos detalhados que incluam análises genômicas e fenotípicas, possibilitando a identificação de cepas com habilidades específicas e aprimoradas de biocontrole.

Paralelamente, o entendimento dos mecanismos moleculares envolvidos na interação entre *Bacillus* e fitonematóides é determinante para compreender os processos bioquímicos e genéticos que mediam essa interação, além da investigação detalhada das vias metabólicas e dos compostos antimicrobianos produzidos por *Bacillus*, pode revelar novos métodos para potencializar a ação biocontroladora e aumentar a resistência das plantas aos ataques de fitonematóides.

A inovação tecnológica também desempenha um papel fundamental no aprimoramento da eficácia do biocontrole. O desenvolvimento de formulações nanoestruturadas e sistemas de liberação controlada tem o potencial de melhorar significativamente a eficiência e a persistência de *Bacillus* no solo. Estas tecnologias permitem uma aplicação mais precisa e duradoura, garantindo que as cepas de *Bacillus* permaneçam ativas e eficazes por períodos prolongados, mesmo em condições ambientais adversas.

A integração de *Bacillus* com práticas agrícolas tradicionais e outros agentes biológicos pode criar sinergias que amplifiquem os efeitos de controle e reduzam a necessidade de intervenções químicas. Esta abordagem holística pode contribuir para a sustentabilidade e a sanidade dos agroecossistemas, promovendo um equilíbrio natural que favorece o crescimento das culturas.

A demonstração da viabilidade econômica do uso de *Bacillus* em diferentes sistemas de produção agrícola é fundamental para a sua adoção em larga escala. Estudos comparativos que analisem os custos e benefícios do biocontrole em relação aos métodos convencionais são essenciais para convencer os produtores da eficácia e das vantagens econômicas dessa abordagem em suas propriedades.

A promoção de programas de treinamento e extensão rural pode facilitar a transferência de tecnologia e o acesso dos produtores às soluções biológicas, tornando o uso de *Bacillus* uma prática mais comum e difundida. Embora o controle químico seja uma prática tradicional, suas limitações e impactos negativos tornam-no insustentável a longo prazo. O biocontrole, especialmente com o uso de bactérias biocontroladoras, surge como uma alternativa promissora e sustentável.

A implementação bem sucedida do biocontrole depende de avanços científicos, desenvolvimento tecnológico e estratégias de manejo integrado. A exploração da diversidade genética, a compreensão dos mecanismos moleculares, o desenvolvimento de novas formulações e a integração de métodos de controle,

aliados à análise econômica, formam uma base sólida para a implementação eficaz e sustentável desta ferramenta na agricultura. Estes avanços poderão acelerar o uso de *Bacillus* no controle de fitonematóides, promovendo uma agricultura mais segura e ecologicamente correta.

REFERÊNCIAS

AB RAHMAN, S.F.S.; SINGH E.; PIETERSE C.M.; SCHENK P.M. Estratégias emergentes de biocontrole microbiano para patógenos de plantas. **Plant Sci**. 2018; 267 :102–111. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2017.11.012. Acesso em: 24 abr. 2024.

ABBAS, A.; KHAN, SU.; KHAN, WU.; SALEH, T.A; KHAN, M.H.U.; ULLAH, S.; ALI A.; IKRAM M. Efeitos antagonistas de cepas de Bacillus spp. contra *Rhizoctonia solani* pela sua proteção contra diversas doenças de plantas: Alternativas aos pesticidas químicos. **Comptes Rendus Biol**. 2019; 342 :124–135. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.crvi.2019.05.002. Acesso em: 24 abr. 2024.

ABCBio. **Mercado de insumos biológicos cresce 20% ao ano**. ABCBio Notícias, 2019. Disponível em: https://www.abcbio.org.br/noticias. Acesso em: 24 jun. 2024.

CARVALHO, L.F.C. *Bacillus subtilis*: promotor de crescimento em plantas e biocontrolador de doenças. In: Congresso Brasileiro de Microbiologia, 2005, Recife. Anais... Recife: **Sociedade Brasileira de Microbiologia**, 2005. Disponível em: https://doi.org/10.48017/dj.v7i1.2071. Acesso em: 27 jun. 2024.

CASELA, C.E.; FERREIRA, A.S.; PINTO, N.F.J. Biocontrole: uma visão genérica. **Revista Brasileira de Agroecologia**, Rio de Janeiro, v. 1, n. 1, p. 55-67, 2006. Disponível em:https://doi.org/10.33240/rba.v18i3. Acesso em: 24 abr. 2024.

CHOI, H. *et al.* Nematóides Benéficos. **Journal of Nematology,** v. 25, n. 2, p. 271-278, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S0100-29452010000400045. Acesso em: 24 abr. 2024.

CHOUDHARY, D.K; JOHRI, B.N. Interações de *Bacillus* spp. e plantas - com referência especial à resistência sistêmica induzida (ISR) **Microbiol. Res**. 2009; 164 :493–513. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.micres.2008.08.007. Acesso em: 24 abr. 2024.

CHOWDHURY, S.; RAHMAN, A.; NAZRUL, M. M. Biocontrol strategies against nematodes: Recent trends and future directions. **Journal of Agricultural Microbiology**, v. 30, n. 2, p. 105-118, 2024.
Disponível em: https://doi.org/10.1186/s12866-022-02744-2. Acesso em: 24 abr. 2024.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos**, v. 10, safra 2022/23, n. 5, sexto levantamento, Brasília, setembro 2023. Disponível em: https://www.conab.gov.br/. Acesso em: 27 jun. 2024.

COOPER, D. *et al.* Variedades Resistentes. **Crop Science**, v. 63, n. 4, p. 1455-1463, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1590/0100-29452023001. .
Acesso em: 24 abr. 2024.

DHAKAL, R. Biopesticidas: Uma chave para a agricultura sustentável. Int. J. Pure Appl. Biosci. 2019; 7 :391–396. Disponível em: https://doi.org/10.18782/2320-7051.7034. Acesso em: 24 jun. 2024.

DIAS, W.P.; SILVA, J.F.V.; CARNEIRO, G.E.S.; GARCIA, A.; ARIAS, C.A.A. Nematóides de cisto da soja: biologia e manejo pelo uso da resistência genética. **Nematologia Brasileira**, 33 (1):1-16. 2009. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/242669070_Nematoide_de_Cisto_da_Soja_Biologia_e_Manejo_Pelo_Uso_da_Resistencia_Genetica/citation/download. Acesso em: 24 abr. 2024.

DIAZ, C. A. Mecanismos de ação de *Bacillus amyloliquefaciens* no controle de *Rhizoctonia solani* e *Meloidogyne* spp. 2018. Disponível em: Disponível em: https://doi.org/10.47328/ufvcrp.2023.002. Acesso em: 27 jun. 2024.

EMBRAPA. Novas parcerias para expandir o controle biológico no Brasil. **Embrapa Notícias**, 2022. Disponível em: https://www.embrapa.br/noticias. Acesso em: 24 jun. 2024.

EMBRAPA. Programa de manejo integrado de pragas utiliza controle biológico para maior sustentabilidade. **Embrapa Notícias**, 2020. Disponível em: https://www.embrapa.br/noticias. Acesso em: 24 jun. 2024.

FILHO, A.B. *et al. Bacillus subtilis*: a versatile tool for integrated pest and disease management. São Paulo: Editora USP, 2010.

FIRA, D., DIMKIC, I., BERIC, T., LOZO, J., E STANKOVIC, S. Controle biológico de patógenos de plantas por espécies de Bacillus. J. Biotechnol. 285, 44–55.2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2018.07.044. Acesso em: 24 fev. 2024.

FORBES, J. M. World Population: A report by the United Nations. New York: **UN Publications**, 2022. Disponível em: https://population.un.org/wpp/. Acesso em: 24 abr. 2024.

GIL, A.C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2006.

GÓMEZ-VALERO, L. *et al. Bacillus* spp. no controle biológico de fitonematoides: aspectos moleculares e aplicações práticas. **Biocontrol Science and Technology**, v. 30, n. 5, p. 486-498, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.33448/rsd-v10i9.17817. Acesso em: 24 abr. 2024.

GÓMEZ-VALERO, L. *et al.* ***Bacillus*** **spp. no manejo integrado de doenças e pragas: perspectivas para a agricultura sustentável**. 2020. Disponível em: file:///C:/Users/55429/Downloads/17817-Article-225524-1-10-20210724%20(1).pdf. Acesso em: 27 jun. 2024.

JIA, Y.; HUANG, J.; QI, L.; ZHANG, X.; LIU, J.; GUAN, H. A cepa *Bacillus subtilis* BS06 protege as raízes da soja da infecção por *Fusarium oxysporum* . **FEMS**

Microbiol. Vamos. 368:fnab102. 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1093/femsle/fnab102. Acesso em: 24 fev. 2024.

KARSSEN, N. *et al.* The plant-parasitic nematode genus *Meloidogyne* Goeldi, 1887 (Tylenchida) in Europe. In: **Nematology Monographs and Perspectives**, v. 11, p. 45-58, 2013. Disponível em: Disponível em: https://doi.org/10.1163/9789004475939 Acesso em: 24 abr. 2024.

KHAN, A.R; MUSTAFA, A.; HYDER, S.; VALIPOUR, M.; RIZVI, Z.F.; GONDAL, A.S.; YOUSUF, Z.; IQBAL, R.; DARAZ, U. *Bacillus* spp. as Bioagents: Uses and Application for Sustainable **Agriculture. Biology** (Basel). 2022 Dec 5;11(12):1763. Disponível em: https://doi.org/10.3390/biology11121763. Acesso em: 24 fev. 2024.

LIU, D.; LI, K.; HU, J.; WANG, W.; LIU, X.; GAO, Z. Biocontrole e mecanismo de ação de *Bacillus amyloliquefaciens* e *Bacillus subtilis* na queima de *Phytophthora* da soja. **Internacional J. Mol. Ciência**. 20:2908. 2019. Disponível em: https://doi.org/10.3390/ijms20122908. Acesso em: 24 fev. 2024.

LOPES, A.P.M**. Mix de plantas de cobertura no manejo de *Meloidogyne* e *Pratylenchus brachyurus* na cultura da soja.** 2023. Tese (Doutorado em Agronomia/Proteção de Plantas) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2023. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/items/0e1dc64a-8523-4dac-bb04-a9d67b8637fc Acesso em: 24 abr. 2024.

LOSS, A.P. **Controle biológico de nematoides no cafeeiro: uma análise bibliométrica.** 2023. Disponível em: https: //repositorio.ifes.edu.br/handle/123456789/4134. Acesso em: 24 abr. 2024.

MISHRA, J.; PRAKASH J.; ARORA N.K. Papel dos micróbios benéficos do solo na agricultura sustentável e na gestão ambiental. Clim. Chang. Meio Ambiente. **Sustentar**. 2016; 4 :137. Disponível em: https://doi.org/10.5958/2320-642X.2016.00015.6. Acesso em: 24 fev. 2024.

MORIN, L. Progresso no controle biológico de ervas daninhas com fitopatógenos. Anu. **Rev. Fitopatol.** 58, 201–223. 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-010820-012823. Acesso em: 24 fev. 2024.

PARRA, J. R. P. Biological Control in Brazil: An overview. **Scientia Agricola**, 71(5): 420-429. 2014. Disponível em: https://doi.org/10.1590/0103-9016-2014-0167. Acesso em: 24 abr. 2024.

SHARMA, R.; SINGH, P.; KUMAR, V. Induced resistance and competition: Key mechanisms in the biocontrol of nematodes. **Plant Protection Science**, v. 60, n. 4, p. 355-368, 2023. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/236985095_Plant_Parasitic_Nematodes_in_Subtropical_and_Tropical_Agriculture_2nd_Edition. Acesso em: 24 abr. 2024.

SIKORA, R.A. *et al.* Plant parasitic nematodes in subtropical and tropical agriculture. In: CABI **Agriculture and Bioscience Series,** v. 2, p. 145-162, 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/236985095_Plant_Parasitic_Nematodes_in_Subtropical_and_Tropical_Agriculture_2nd_Edition Acesso em: 24 abr. 2024.

SOARES, M. A.; SILVA, C. R.; OLIVEIRA, R. M. Manejo integrado de pragas e suas vantagens. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 19, n. 3, p. 233-246, 2016. Disponível em: http://www.agraria.pro.br/ojs32/index.php/RBCA . Acesso em: 24 abr. 2024.

SOUZA, R.D.; AMBROSINI, A.; PASSAGLIA, L.M.P. Bactérias promotoras do crescimento de plantas como inoculantes em solos agrícolas. **Genet. Mol. Biol**. 2015; 38 :401–419. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S1415-475738420150053. Acesso em: 24 fev. 2024.

VIEIRA, R. F. *et al.* **Diversidade genética e mecanismos de ação de estirpes de *Bacillus* para o biocontrole de fitonematóides**. 2021. Disponível em: <link>. Acesso em: 27 jun. 2024. Disponível em https://doi.org/10.1590/S0100-204X2012001200012. Acesso em: 24 abr. 2024.

YI Y., LUAN P., LIU S., SHAN Y., HOU Z., ZHAO S., JIA S., LI R. Eficácia de *Bacillus subtilis* XZ18-3 como um agente de biocontrole contra *Rhizoctonia cerealis* em trigo. **Agricultura**. 2022; 12 :258. Disponível em: https://doi.org/10.3390/agriculture12020258. Acesso em: 24 abr. 2024.

Zhang, X.; Li, Y.; Feng, H.; Wang, X. Fungicide resistance in plant pathogens: Current status and future perspectives. **Pesticide Biochemistry and Physiology**, 192, 105087.2023. Disponível em: https://doi.org/10.3390/microorganisms9010119 Acesso em: 24 abr. 2024.