



**CARLA APARECIDA CARVALHO ANTONIO**

**RIZOBACTÉRIAS COMO AGENTES BIOLÓGICOS NO  
CONTROLE DE *Meloidogyne incognita* EM ALFACE**

**LAVRAS – MG  
2026**

**CARLA APARECIDA CARVALHO ANTONIO**

**RIZOBACTÉRIAS COMO AGENTES BIOLÓGICOS NO CONTROLE DE**  
***Meloidogyne incognita* EM ALFACE**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Fitotecnia, para a obtenção do título de Mestre.

Orientadora  
Profa. Dra. Joyce Doria Rodrigues Carvalho

Coorientador  
Prof. Dr. Willian César Terra

Coorientadora  
Profa. Dra. Vytória Piscitelli Cavalcanti

**LAVRAS-MG**

**2026**

**Ficha Catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração  
de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA, com  
dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Antonio, Carla Aparecida Carvalho.

Rizobactérias como agentes biológicos no controle de meloidogyne incognita em  
alface / Carla Aparecida Carvalho Antonio. - 2026.  
61 p.

Orientadora: Joyce Dória

Coorientadora: Vytória Cavalcanti

Coorientador: Willian Terra

Dissertação (Mestrado Acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2026.  
Bibliografia.

1. Controle biológico. 2. Bactérias promotoras de crescimento vegetal. 3.  
Quimiotaxia. 4. Nematoides-das-galhas. 5. Lactuca sativa. I. Dória, Joyce. II.  
Cavalcanti, Vytória. III. Terra, Willian. IV. Universidade Federal de Lavras. V. Título.

**CARLA APARECIDA CARVALHO ANTONIO**

**RIZOBACTÉRIAS COMO AGENTES BIOLÓGICOS NO CONTROLE DE**  
*Meloidogyne incognita* **EM ALFACE**

**RIZOBACTERIA AS BIOLOGICAL AGENTS IN THE CONTROL OF**  
*Meloidogyne incognita* **IN LETTUCE**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Fitotecnia, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 12 de fevereiro de 2026.

Profa. Dra. Joyce Doria Rodrigues Carvalho UFLA

Profa. Dra. Aline Ferreira Barros UNITINS

Prof. Dr. Sebastião Márcio de Azevedo UFLA

Orientadora  
Joyce Doria Rodrigues Carvalho

Coorientador  
Prof. Dr. Willian César Terra

Coorientadora  
Profa. Dra. Vytória Piscitelli Cavalcanti

**LAVRAS-MG**

**2026**

## RESUMO

O cultivo de alface (*Lactuca sativa* L.) enfrenta desafios consideráveis devido à presença de nematoides-das-galhas (*Meloidogyne* spp.), os quais são altamente prejudiciais e afetam significativamente a cultura. Compreender os mecanismos pelos quais esses nematoides são atraídos e infectam as plantas hospedeiras é fundamental para o desenvolvimento de estratégias de controle eficazes. As bactérias promotoras de crescimento vegetal (BPCVs) não apenas favorecem o desenvolvimento e o crescimento das plantas, mas também interferem na atração e no comportamento dos nematoides ao modificar os exsudatos radiculares, consolidando-se como uma abordagem eficaz no manejo do nematoide-das-galhas. A quimiotaxia desempenha papel crucial nesse processo, atuando como um mecanismo pelo qual os nematoides detectam sinais químicos e se orientam em direção às raízes das plantas. Bactérias do gênero *Bacillus* spp. vêm sendo amplamente estudadas devido à sua capacidade de interferir nesse processo, seja promovendo a repelência, seja dificultando o acesso dos nematoides às raízes. Dessa forma, objetivou-se avaliar o potencial de isolados bacterianos no controle de *Meloidogyne incognita* e na promoção do crescimento da alface, com foco na interação quimiotática e na influência desses microrganismos sobre o comportamento dos nematoides. Para isso, foram realizadas avaliações fitotécnicas, bioquímicas e microbiológicas, incluindo a densidade populacional de nematoides, o crescimento das plantas e a colonização radicular pelas bactérias. Os isolados foram comparados a um controle comercial (BioMagno) e a um controle negativo (água). As avaliações das variáveis de desenvolvimento vegetal e do fator de reprodução dos nematoides foram realizadas aos 45 dias após a inoculação, permitindo compreender os efeitos das bactérias tanto no controle do fitopatógeno quanto na promoção do crescimento da alface. O experimento foi conduzido em duas épocas distintas, visando à confirmação dos resultados obtidos. Os resultados evidenciaram que a inoculação com bactérias promoveu melhorias significativas no desenvolvimento da alface e no controle de *M. incognita*. No ensaio de quimiotaxia, os isolados de *Bacillus thuringiensis* e *Pseudomonas aeruginosa* apresentaram o maior efeito repelente, reduzindo a atratividade das raízes aos juvenis do nematoide. Quanto aos parâmetros fitotécnicos, as plantas tratadas com bactérias, especialmente os isolados de *Bacillus*, apresentaram maior acúmulo de biomassa e melhor estado nutricional (maiores teores de N e P) em comparação ao controle infectado. Além disso, o isolado *Bacillus pumilus* destacou-se pela redução acentuada do número de galhas e do fator de reprodução, demonstrando alta eficiência no biocontrole. Conclui-se que o uso dessas bactérias é uma alternativa

biotecnológica viável, atuando tanto na repelência inicial quanto na supressão populacional do nematoide e na promoção do crescimento vegetal.

**Palavras-chave:** controle biológico; bactérias promotoras de crescimento vegetal; quimiotaxia; nematoides-das-galhas, *Lactuca sativa*.

## ABSTRACT

Lettuce cultivation (*Lactuca sativa* L.) faces considerable challenges due to the presence of root-knot nematodes (*Meloidogyne* spp.), which are highly harmful and significantly affect the crop. Understanding the mechanisms by which these nematodes are attracted to and infect host plants is essential for the development of effective control strategies. Plant growth-promoting bacteria not only enhance plant development and growth but also interfere with nematode attraction and behavior by modifying root exudates, thus establishing themselves as an effective approach in the management of root-knot nematodes. Chemotaxis plays a crucial role in this process, acting as a mechanism by which nematodes detect chemical signals and orient themselves toward plant roots. Bacteria of the genus *Bacillus* spp. have been widely studied due to their ability to interfere with this process, either by promoting repellence or by hindering nematode access to the roots. Thus, the objective of this study was to evaluate the potential of bacterial isolates in the control of *Meloidogyne incognita* and in promoting lettuce growth, focusing on chemotactic interaction and the influence of these microorganisms on nematode behavior. For this purpose, phytotechnical, biochemical, and microbiological evaluations were carried out, including nematode population density, plant growth, and root colonization by bacteria. The isolates were compared with a commercial control (BioMagno) and a negative control (plants inoculated with *incognita*, but without the application of bacteria). Evaluations of plant development variables and the nematode reproduction factor were performed 45 days after inoculation, allowing the effects of bacteria on both phytopathogen control and lettuce growth promotion to be understood. The experiment was conducted in two different periods in order to confirm the obtained results. The results showed that inoculation with bacteria promoted significant improvements in lettuce development and in the control of *M. incognita*. In the chemotaxis assay, the isolates of *Bacillus thuringiensis* and *Pseudomonas aeruginosa* showed the greatest repellent effect, reducing the attractiveness of the roots to nematode juveniles. Regarding phytotechnical parameters, plants treated with bacteria, especially the *Bacillus* isolates, showed greater biomass accumulation and improved nutritional status (higher N and P contents) compared with the infected control. In addition, the isolate *Bacillus pumilus* stood out due to the marked reduction in the number of galls and the reproduction factor, demonstrating high efficiency in biological control. It is concluded that the use of these bacteria represents a viable biotechnological alternative, acting both in the initial repellence and in the population suppression of the nematode, as well as in the promotion of plant growth.

**Keywords:** biological control; plant growth-promoting bacteria; chemotaxis; root-knot nematodes; *Lactuca sativa*.

## INDICADORES DE IMPACTO

O presente estudo evidencia impactos sociais, tecnológicos, econômicos e ambientais relevantes, ainda que, em sua maioria, com caráter potencial e parcialmente comprovado em condições controladas. Em relação ao impacto tecnológico, a pesquisa mostra, de forma quantitativa, a eficiência de isolados bacterianos na redução do fator de reprodução de *Meloidogyne incognita* (com valores inferiores a 1,0 em tratamentos específicos), na diminuição do número de galhas e ovos e na melhoria de parâmetros agrônômicos da alface, como biomassa e crescimento radicular, o que indica aplicabilidade direta no desenvolvimento de bioinsumos. Sob a perspectiva econômica, os resultados indicam um potencial aumento da produtividade e uma redução de perdas em sistemas hortícolas, especialmente para pequenos e médios produtores, ao diminuir a dependência de nematicidas químicos, provocando a redução de custos de produção. Já no âmbito social, o trabalho contribui para a promoção de práticas agrícolas mais seguras, com menor exposição de agricultores e consumidores a resíduos tóxicos, impactando positivamente a qualidade de vida. Na perspectiva ambiental, é possível destacar a redução do uso de insumos químicos, além da preservação da microbiota do solo, alinhando-se a sistemas produtivos sustentáveis. O estudo ainda apresenta caráter potencial extensionista, pois pode ser transferido para produtores rurais, técnicos agrícolas e cooperativas, especialmente na região de Lavras (MG), além demonstrar relevância em outras áreas produtoras de hortaliças, com público diretamente beneficiado como agricultores familiares e cadeias produtivas locais. Os impactos podem ser classificados nas áreas temáticas de Meio Ambiente, Tecnologia e Produção, Trabalho e Educação, conforme a Política Nacional de Extensão. Ademais, os resultados estão alinhados com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, especialmente ODS 2 (Fome Zero e Agricultura Sustentável), ODS 3 (Saúde e Bem-Estar), ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis) e ODS 15 (Vida Terrestre), ao promover alternativas sustentáveis para o manejo de fitonematoides e fortalecer práticas agrícolas ambientalmente responsáveis.

## IMPACT INDICATORS

The present study demonstrates relevant social, technological, economic, and environmental impacts, although most of them are potential and partially confirmed under controlled conditions. Regarding the technological impact, the research quantitatively shows the efficiency of bacterial isolates in reducing the reproduction factor of *Meloidogyne incognita* (with values lower than 1.0 in specific treatments), decreasing the number of galls and eggs, and improving agronomic parameters of lettuce, such as biomass and root growth, indicating direct applicability in the development of bioinputs. From an economic perspective, the results indicate a potential increase in productivity and a reduction in losses in horticultural systems, especially for small and medium-sized producers, by decreasing dependence on chemical nematicides and, consequently, reducing production costs. In the social sphere, the study contributes to the promotion of safer agricultural practices, with lower exposure of farmers and consumers to toxic residues, positively impacting quality of life. From an environmental perspective, it is possible to highlight the reduction in the use of chemical inputs, as well as the preservation of soil microbiota, aligning with sustainable production systems. The study also presents potential extension character, as it can be transferred to rural producers, agricultural technicians, and cooperatives, especially in the region of Lavras (MG), in addition to demonstrating relevance in other vegetable-producing areas, with the directly benefited public including family farmers and local production chains. The impacts can be classified within the thematic areas of Environment, Technology and Production, Work, and Education, according to the National Extension Policy. Furthermore, the results are aligned with the Sustainable Development Goals, especially SDG 2 (Zero Hunger and Sustainable Agriculture), SDG 3 (Good Health and Well-being), SDG 12 (Responsible Consumption and Production), and SDG 15 (Life on Land), by promoting sustainable alternatives for the management of phytonematodes and strengthening environmentally responsible agricultural practices.

## SUMÁRIO

|                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 INTRODUÇÃO.....                                                                                                        | 12 |
| 2 REFERENCIAL TEÓRICO .....                                                                                              | 14 |
| 2.1 Lactuca sativa: Características Botânicas e Importância Econômica .....                                              | 14 |
| 2.2 Fitonematoides .....                                                                                                 | 15 |
| 2.3 <i>Meloidogyne</i> spp. e sua Importância na Agricultura .....                                                       | 17 |
| 2.4 Manejo de <i>Meloidogyne</i> spp .....                                                                               | 18 |
| 2.5 Controle biológico .....                                                                                             | 19 |
| 2.6 Quimiotaxia: Conceito e Relevância no Manejo de Nematoides .....                                                     | 21 |
| 2.7 Potencial das Rizobactérias na Indução de Resistência Sistêmica em Plantas .....                                     | 22 |
| 2.8 Biofilmes e Colonização da Rizosfera.....                                                                            | 22 |
| 2.9 Compostos Voláteis Produzidos por <i>Bacillus</i> spp. e Seu Efeito Antagonista .....                                | 23 |
| 2.10 Aplicações de Ferramentas Ômicas na Avaliação de Rizobactérias .....                                                | 24 |
| 2.11 Parâmetros fisiológicos (SPAD, Prolina e SOD) .....                                                                 | 25 |
| 3 MATERIAL E MÉTODOS .....                                                                                               | 27 |
| 3.1 Obtenção, Identificação e Multiplicação de <i>Meloidogyne</i> spp .....                                              | 27 |
| 3.2 Origem dos Isolados Bacterianos.....                                                                                 | 27 |
| 3.3 Manutenção dos Isolados Bacterianos .....                                                                            | 30 |
| 3.4 Avaliação dos Isolados Quanto à Produção de Compostos Relacionados ao<br>Biocontrole e Promoção do Crescimento ..... | 31 |
| 3.4.1 Hidrólise de Amido .....                                                                                           | 31 |
| 3.4.2 Solubilização de Fosfatos.....                                                                                     | 31 |
| 3.4.3 Hidrólise de Quitina.....                                                                                          | 32 |
| 3.4.4 Atividade de ACC Deaminase.....                                                                                    | 32 |
| 3.4.5 Ensaio de Quimiotaxia <i>In Vitro</i> .....                                                                        | 33 |
| 3.5 Condução de Experimentos em Casa de Vegetação .....                                                                  | 34 |
| 3.5.1 Experimento 1: Avaliação do controle biológico de <i>Meloidogyne incognita</i> .....                               | 35 |
| 3.5.2 Experimento 2: Avaliação da promoção de crescimento vegetal .....                                                  | 35 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....                                                                                           | 36 |
| 4.1 Crescimento vegetativo.....                                                                                          | 36 |
| 4.2 Nutrição mineral (N, P, K).....                                                                                      | 43 |
| 4.3 Análise dos Parâmetros fisiológicos (SPAD, Prolina, SOD).....                                                        | 46 |
| 4.4 Ensaios de atividade bacteriana.....                                                                                 | 49 |
| 4.5 Parâmetros nematológicos .....                                                                                       | 51 |
| 5. CONCLUSÃO .....                                                                                                       | 56 |
| REFERÊNCIAS.....                                                                                                         | 57 |

## 1 INTRODUÇÃO

O cultivo de alface (*Lactuca sativa* L.) mantém elevada relevância econômica e social no Brasil, consolidando-se como a hortaliça folhosa mais consumida no país, em razão de sua ampla aceitação pelos consumidores e da expressiva demanda no mercado interno. A produção ocorre predominantemente em pequenas e médias propriedades rurais, especialmente nos cinturões verdes próximos aos grandes centros urbanos, exercendo papel estratégico na geração de renda, emprego e no fortalecimento da agricultura familiar. Estimativas recentes indicam que a produção nacional se situa entre 650 e 700 mil toneladas anuais, com área cultivada superior a 30 mil hectares, destacando-se os estados de São Paulo, Minas Gerais, Paraná e Rio de Janeiro como principais polos produtores (IBGE, 2024). Informações setoriais também apontam expansão do cultivo em sistemas intensivos e protegidos, como a hidroponia, entre 2023 e 2024, refletindo a modernização da cadeia produtiva, a busca por maior eficiência e a oferta contínua de produtos de qualidade ao consumidor (ABCSEM, 2024).

Contudo, a cultura da alface enfrenta desafios constantes, sobretudo em relação ao ataque de pragas e doenças, entre as quais os nematoides parasitas de plantas, como *Meloidogyne* spp., destacam-se por causar grandes prejuízos à produtividade agrícola. Esses nematoides atacam as raízes das plantas, alimentando-se do conteúdo celular, resultando em danos significativos que comprometem o desenvolvimento das culturas, diminuindo a produtividade e, em casos extremos, levando à morte das plantas (Cavalcanti, 2022).

O controle biológico de fitonematoídes tem se destacado na nematologia contemporânea por empregar microrganismos benéficos no manejo desses parasitas, com ênfase nas bactérias do gênero *Bacillus* (Forghani; Hajihassani, 2020). Essas bactérias apresentam elevado potencial nematicida devido à produção de metabólitos secundários, como lipopeptídeos, enzimas hidrolíticas, endotoxinas e compostos voláteis, que interferem diretamente no ciclo de vida dos nematoides, reduzindo a oviposição, a eclosão dos ovos e a sobrevivência dos juvenis de segundo estágio (J2), especialmente em espécies do gênero *Meloidogyne* (Xiang *et al.*, 2018; Abd-Elgawad; Askary, 2020; El-Nagdi, Youssef, Dawood, 2022). Além do efeito direto sobre os nematoides, essas bactérias contribuem para a promoção do crescimento vegetal e para a indução de resistência sistêmica nas plantas hospedeiras, favorecendo a redução das populações desses patógenos no solo e o comprometimento do estabelecimento da infecção radicular (Abd-Elgawad; Askary, 2020; Forghani; Hajihassani, 2020).

Além disso, essas bactérias apresentam a capacidade de solubilizar nutrientes minerais pouco disponíveis no solo, como fósforo e potássio, além de fixar nitrogênio atmosférico e produzir fitormônios, tornando esses compostos assimiláveis pelas plantas. Esses mecanismos contribuem para a melhoria do desenvolvimento vegetativo, do sistema radicular e, conseqüentemente, para o aumento da produtividade agrícola (Vessey, 2003; Glick, 2014).

Bactérias do gênero *Bacillus* podem converter exsudatos radiculares em subprodutos que interferem no processo de reconhecimento da planta hospedeira pelos nematoides, alterando sinais químicos envolvidos na quimiotaxia e dificultando a localização das raízes (Forghani; Hajihassani, 2020). Considerando esse cenário, *Bacillus* spp. são amplamente utilizados no controle biológico de nematoides parasitas de plantas, especialmente pelo seu impacto na quimiotaxia, um mecanismo crucial pelo qual os nematoides detectam e se orientam em direção às plantas hospedeiras. Ao proteger as plantas, essas bactérias reduzem a dependência de produtos químicos, promovendo uma agricultura mais sustentável e ambientalmente amigável.

Diante do exposto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência de isolados bacterianos no controle biológico do nematoide-das-galhas (*Meloidogyne incognita*) e na promoção do crescimento da alface (*Lactuca sativa* L.). Especificamente, buscou-se investigar a capacidade dessas bactérias de interferir na quimiotaxia e no comportamento de orientação dos juvenis de segundo estágio (J2), bem como seus efeitos sobre a densidade populacional e o fator de reprodução do fitonematoide. Adicionalmente, avaliou-se a influência dos isolados sobre o desenvolvimento vegetativo da cultura e a colonização do sistema radicular, visando elucidar mecanismos diretos e indiretos envolvidos na supressão do patógeno. Dessa forma, o estudo pretende contribuir para o desenvolvimento de estratégias sustentáveis de manejo de nematoides fitoparasitos, reduzindo a dependência de nematicidas químicos e promovendo sistemas agrícolas mais eficientes e ambientalmente responsáveis.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 *Lactuca sativa*: Características Botânicas e Importância Econômica

A alface (*Lactuca sativa* L.), pertencente à família Asteraceae, é a hortaliça folhosa mais consumida no Brasil, destacando-se por sua importância econômica e nutricional. De fácil cultivo e consumo, a alface é rica em vitaminas (A, C, K), minerais (como cálcio e ferro) e fibras, além de possuir baixo teor calórico, o que a torna um alimento essencial em dietas balanceadas. Sua popularidade na dieta brasileira deve-se à sua versatilidade e ao seu valor como componente de saladas e outros pratos leves, favorecendo o consumo saudável (Carvalho *et al.*, 2005, Souza *et al.*, 2019).

A produção de alface no Brasil apresenta grande relevância econômica e social no setor hortícola, sendo uma das hortaliças folhosas mais consumidas no país. De acordo com dados recentes da Produção Agrícola Municipal, a olericultura brasileira é amplamente distribuída pelo território nacional, com predominância nas regiões Sudeste e Sul, onde se concentram os principais polos de produção e abastecimento de hortaliças frescas. Estados como São Paulo, Minas Gerais e Paraná destacam-se entre os maiores produtores, devido à proximidade com grandes centros consumidores, infraestrutura logística e condições climáticas favoráveis ao cultivo. A produção de alface ocorre majoritariamente em pequenas e médias propriedades agrícolas, frequentemente conduzidas por agricultores familiares, que desempenham papel fundamental no abastecimento de feiras, mercados e redes varejistas. Além disso, a cultura possui grande importância socioeconômica, contribuindo significativamente para a geração de emprego, renda e dinamização da agricultura periurbana em diversas regiões do país (IBGE, 2024).

Do ponto de vista botânico, a alface é uma espécie anual de ciclo relativamente curto (cerca de 30 dias no verão e 45 dias no inverno, dependendo da cultivar e do sistema de cultivo após transplante), apresentando sistema radicular predominantemente fasciculado e pouco profundo, característica que a torna particularmente sensível a estresses hídricos, salinos e a patógenos de solo, como os fitonematoides. A arquitetura foliar varia conforme o grupo varietal (lisa, crespa, americana, romana, mimosa, entre outras), o que também influencia a adaptação às condições ambientais, ao manejo e ao mercado consumidor (Maldonado; Mattos; Moretti, 2014).

A alface se adapta melhor em temperaturas que variam entre 18 e 25 °C, com seu desenvolvimento sendo afetado negativamente em temperaturas superiores a 30 °C, o que pode resultar em florescimento precoce (pendoamento) e queda na qualidade comercial do produto.

No entanto, graças ao contínuo investimento em melhoramento genético, novas cultivares de alface mais resistentes a variações climáticas e a estresses bióticos e abióticos têm sido desenvolvidas. Essas cultivares permitiram a expansão do cultivo de alface para diversas regiões do país, possibilitando o plantio durante todo o ano, mesmo em condições adversas (Cavalcanti, 2022).

Nos últimos anos, tem havido um aumento no uso de sistemas de cultivo protegido, como casas de vegetação, túneis altos, hidroponia e cultivo em ambiente controlado, que melhoram o rendimento e a qualidade da produção de alface. Esses sistemas permitem o controle de fatores ambientais, como temperatura, umidade, luminosidade e disponibilidade de nutrientes, contribuindo para maior eficiência no uso da água e menor dependência de pesticidas. O cultivo hidropônico, em particular, tem mostrado grande viabilidade econômica no Brasil, com rendimentos superiores ao cultivo em campo aberto e com forte demanda entre consumidores que buscam produtos com menor impacto ambiental e maior padronização visual (Souza *et al.*, 2019).

## **2.2 Fitonematoides**

Os nematoides são considerados um dos principais patógenos que afetam a agricultura mundial, devido aos prejuízos econômicos significativos que causam em uma ampla gama de culturas de importância agrícola. Estimativas globais indicam que perdas causadas por nematoides parasitas de plantas podem alcançar bilhões de dólares por ano, afetando culturas de grãos, fibras, frutíferas e hortaliças (Jones *et al.*, 2013). Esses organismos microscópicos parasitam principalmente o sistema radicular das plantas, comprometendo seu desenvolvimento e produtividade.

Os sintomas mais comuns da presença de nematoides manifestam-se em áreas irregulares nas lavouras, conhecidas como reboleiras. Nessas áreas, as plantas costumam apresentar menor vigor, subdesenvolvimento da parte aérea, amarelecimento da folhagem e maior sensibilidade ao estresse, em decorrência da redução da eficiência do sistema radicular na absorção de água e nutrientes. Tais sintomas na parte aérea são frequentemente confundidos com deficiência nutricional ou estresse hídrico (Castro; Moreira, 2012). A dificuldade em diferenciar visualmente danos de nematoides de outras causas (como deficiência nutricional ou compactação de solo) contribui para a subestimativa do problema enfrentado com nematoides parasitas de plantas em campo.

Os fitonematoídes possuem uma estrutura especializada chamada de estilete, em seu aparelho bucal, que lhes permite parasitar as plantas. Esse estilete atua como uma agulha hipodérmica, perfurando as células das raízes e extraindo nutrientes, ao mesmo tempo em que injeta secreções produzidas nas glândulas esofagianas, capazes de reprogramar o metabolismo celular. Essas alterações fisiológicas resultam em redução no crescimento das plantas e diminuição na produção agrícola. Plantas afetadas por nematoídes desenvolvem sistemas radiculares debilitados, o que as torna mais vulneráveis a infecções secundárias, como ataques de fungos e bactérias patogênicas (Charchar, 1999; Castro; Moreira, 2012).

Além do impacto direto causado pela alimentação dos nematoídes, eles podem interagir com outros patógenos, agravando os problemas fitossanitários. Em muitas culturas, a presença de nematoídes está associada a complexos de doenças, nos quais fungos de solo (por exemplo, *Fusarium* spp., *Rhizoctonia* spp., *Verticillium* spp.) ou bactérias fitopatogênicas encontram portas de entrada facilitadas pelas injúrias nas raízes, resultando em murchas, podridões e declínio geral da planta. Esse efeito sinérgico é particularmente relevante em culturas de alto valor econômico, como tomateiro, batata, café e diversas hortaliças (Cavalcanti, 2022).

Entre os nematoídes fitoparasitas mais comuns e prejudiciais está o gênero *Meloidogyne*, também conhecido como nematoíde-das-galhas, amplamente distribuído em diferentes regiões agrícolas e com grande amplitude de hospedeiros. Outras espécies importantes incluem *Pratylenchus* spp. (nematoídes das lesões radiculares), *Heterodera* e *Globodera* (nematoídes de cisto), e *Rotylenchulus reniformis* (nematoíde reniforme), entre outros (Ferraz, 2001; Jones *et al.*, 2013). O grupo dos nematoídes-das-galhas, entretanto, se destaca pelo impacto expressivo em hortaliças, incluindo a alface.

O manejo dos fitonematoídes é um desafio constante para os agricultores, exigindo estratégias integradas que envolvam rotação de culturas, uso de cultivares resistentes, práticas culturais que desfavoreçam o patógeno, controle biológico e, em alguns casos, uso criterioso de nematicidas químicos. Além disso, os nematoídes apresentam alta capacidade de sobrevivência no substrato comercial (Tropstrato HA Hortaliças), por meio de ovos resistentes ou estádios dormentes e, muitas vezes, de ampla gama de plantas hospedeiras, o que torna a erradicação praticamente impossível e reforça a necessidade de manejo contínuo e integrado (Cavalcanti, 2022).

### 2.3 *Meloidogyne* spp. e sua Importância na Agricultura

No Brasil, diversos fitonematoides estão associados às principais culturas agrícolas, sendo que o gênero *Meloidogyne* se destaca como um dos mais importantes do ponto de vista econômico. Os nematoides-das-galhas causam danos severos em diversas plantas de valor econômico, especialmente hortaliças, frutíferas e culturas industriais. Sua alta capacidade reprodutiva, ampla disseminação e vasta gama de hospedeiros colocam as espécies de *Meloidogyne* entre os fitonematoides mais prejudiciais para a agricultura brasileira (Cavalcanti, 2022).

Nos cultivos de hortaliças, os maiores problemas causados por nematoides estão diretamente relacionados a *Meloidogyne* spp., devido ao seu potencial destrutivo e sua abrangente distribuição geográfica. As espécies que causam maiores danos no Brasil são *incognita* e *javanica*, predominantes nas principais regiões produtoras. Essas espécies são responsáveis por severas reduções na produtividade de culturas como alface, tomate, cenoura, pimentão, batata e outras hortaliças de alto valor agregado, gerando prejuízos significativos (Cavalcanti, 2022). Em situações de alta infestação e ausência de manejo adequado, as perdas podem superar 80% da produção em alface e tomate (Charchar; Moita, 2005).

O ciclo de vida dos nematoides-das-galhas inicia-se com a deposição de ovos, que podem estar contidos em massas gelatinosas externas às raízes ou protegidos em tecidos radiculares. Cada ovo contém um juvenil em desenvolvimento, chamado juvenil de primeiro estágio (J1), cuja estrutura reprodutiva ainda não está completamente desenvolvida. O J1 passa por uma primeira ecdise ainda no interior do ovo, dando origem ao J2, que é sua forma infectante. O J2 eclode utilizando seu estilete para romper a casca do ovo e, então, se desloca no solo em busca de uma planta hospedeira, sendo guiado por gradientes químicos (exsudatos radiculares) e físicos (porosidade, umidade, temperatura) (Ferraz, 2001; Ferraz *et al.*, 2010).

Ao localizar a planta hospedeira, o J2 penetra a raiz, frequentemente próximo à zona de alongamento, e estabelece um sítio de alimentação. Durante esse processo, o nematoíde secreta substâncias de suas glândulas esofagianas, induzindo a formação de células gigantes ao redor do local de alimentação. Essas células apresentam hipertrofia e hiperplasia, com intensa atividade metabólica e multiplicação de núcleos, resultando na formação de galhas – o principal sintoma visível da infecção por *Meloidogyne*. Após estabelecer o sítio de alimentação, o J2 sofre mais duas ecdises, evoluindo para os estádios juvenis de terceiro (J3) e quarto (J4), até atingir o estágio adulto. As fêmeas adultas, de formato piriforme, permanecem inseridas nas

raízes, enquanto os machos, quando presentes, tornam-se vermiformes e migram para o solo (Ferraz, 2001).

A duração do ciclo de vida de *Meloidogyne* spp. varia entre quatro e oito semanas, dependendo das condições ambientais, especialmente temperatura e umidade do solo. Temperaturas na faixa de 25 a 30 °C tendem a favorecer o desenvolvimento mais rápido, enquanto extremos térmicos, acima de 40 °C ou abaixo de 5 °C, podem reduzir ou paralisar as atividades vitais dos nematoides (Ferraz, 2001; Ferraz *et al.*, 2010). Em regiões tropicais e subtropicais, como grande parte do território brasileiro, as condições ambientais frequentemente se aproximam da faixa ótima para o desenvolvimento dessas espécies, o que explica sua importância econômica.

As condições ambientais e as práticas agrícolas influenciam diretamente a disseminação e severidade das infestações por *Meloidogyne* spp. Sistemas de produção contínua com a mesma cultura (monocultivo), ausência de rotação, uso de mudas infestadas e manejo inadequado de restos culturais favorecem o acúmulo populacional do nematoide no solo. Dessa forma, o manejo desses patógenos exige uma abordagem integrada, incluindo o uso de cultivares resistentes, práticas culturais adequadas, controle biológico e, em situações específicas, o uso de nematicidas (Cavalcanti, 2022).

## **2.4 Manejo de *Meloidogyne* spp.**

O manejo eficaz de nematoides do gênero *Meloidogyne* exige uma abordagem integrada, combinando diferentes táticas para reduzir a população no solo, minimizar os danos à cultura e manter a sustentabilidade do sistema produtivo. De modo geral, o manejo integrado de nematoides envolve o uso de cultivares resistentes, práticas culturais como rotação de culturas e incorporação de matéria orgânica, controle biológico e, quando necessário, a aplicação criteriosa de nematicidas químicos (Cavalcanti, 2022). Estudos experimentais demonstram que a adoção isolada dessas estratégias, como o uso exclusivo de nematicidas ou de práticas culturais, geralmente não é suficiente para manter a população de *Meloidogyne* abaixo do nível de dano econômico ao longo do tempo, enquanto a combinação de métodos apresenta maior eficiência e estabilidade no controle do nematoide e na produtividade das culturas (Ferraz *et al.*, 2010; Forghani; Hajihassani, 2020).

Em hortaliças de alto valor, como a alface, o uso de nematicidas sintéticos foi, durante muitos anos, a principal ferramenta para reduzir rapidamente a população de nematoides no solo. Contudo, a restrição regulatória a vários ingredientes ativos, somada à preocupação com impactos ambientais e com resíduos em alimentos frescos, tem impulsionado a substituição

gradual desses compostos por práticas de manejo cultural e bioinsumos (Abd-Elgawad; Askary, 2020). Em alface, trabalhos recentes indicam que formulações biológicas à base de bactérias e fungos nematófagos podem reduzir o número de galhas e de massas de ovos, com desempenho semelhante ou complementar ao de nematicidas químicos, mas com menor risco ambiental (Cavalcanti, 2022).

A rotação de culturas com espécies não hospedeiras ou pouco suscetíveis é uma das práticas mais recomendadas para reduzir a densidade de *Meloidogyne* spp. no solo. Gramíneas e determinadas crucíferas podem diminuir a reprodução do nematoide ao longo de ciclos sucessivos, principalmente quando a biomassa é incorporada ao solo, favorecendo a atividade de microrganismos antagonistas (Ferraz *et al.*, 2010). O uso de plantas com compostos bioativos, como espécies do gênero *Allium*, ou a integração com sistemas que utilizam cogumelos comestíveis, também pode alterar a comunidade microbiana e a química do solo de forma desfavorável aos nematoides (Cavalcanti, 2022).

Outra estratégia importante é a utilização de cultivares com níveis de tolerância ou resistência. Em várias culturas, a resistência genética é reconhecida como uma das formas mais eficientes e econômicas de manejo de *Meloidogyne* spp., embora o desenvolvimento de materiais comerciais que combinem resistência, produtividade e aceitação de mercado seja desafiador (Cavalcanti, 2022). Em alface, ainda há poucas cultivares com resistência estável a diferentes raças de *M. incognita* e *M. javanica*, mas estudos com materiais menos suscetíveis indicam reduções marcantes no fator de reprodução quando essas cultivares são associadas a bioinsumos e a um manejo adequado da fertilidade do solo.

Dessa forma, o manejo de *Meloidogyne* spp. em alface precisa ser entendido como um conjunto de decisões ao longo do ciclo de produção, em que a escolha de cultivares, o manejo do solo, o uso de bioinsumos e, quando necessário, o emprego restrito de nematicidas químicos se complementa. Sistemas baseados apenas em intervenção química tendem a ser menos duráveis e mais suscetíveis a falhas, enquanto estratégias integradas, apoiadas por ferramentas de monitoramento e diagnóstico, oferecem maior estabilidade ao longo dos ciclos de cultivo (Abd-Elgawad; Askary, 2020).

## 2.5 Controle biológico

O controle biológico de fitonematoides é um dos pilares de um manejo sustentável, pois utiliza inimigos naturais para reduzir as populações de *Meloidogyne* sem gerar resíduos tóxicos e sem comprometer a qualidade ambiental. São reconhecidos, entre outros, nematoides

predadores, fungos nematófagos, bactérias rizosféricas e alguns protozoários, embora, na prática agrícola, predominem formulações comerciais à base de bactérias e fungos de solo (Baker; Cook, 1974; Abd-Elgawad; Askary, 2020).

Esses microrganismos podem atuar por parasitismo direto de ovos e juvenis, pela produção de metabólitos com ação nematicida (antibiose), pela competição por espaço e nutrientes na rizosfera e pela indução de respostas de defesa nas plantas. Na planta hospedeira, a presença de microrganismos benéficos frequentemente ativa rotas de sinalização relacionadas ao ácido jasmônico e ao etileno, aumenta a deposição de lignina e compostos fenólicos nas raízes e intensifica a atividade de enzimas antioxidantes, o que resulta em tecidos mais resistentes à penetração e ao estabelecimento dos nematoides (Harman *et al.*, 2004; Adam; Heuer; Hallmann, 2014).

As bactérias do gênero *Bacillus* se destacam por formarem esporos altamente resistentes, colonizarem com eficiência a rizosfera e produzirem uma grande diversidade de antibióticos, lipopeptídeos, enzimas hidrolíticas e compostos voláteis que afetam fungos de solo e nematoides (Cavalcanti, 2022). Estudos com *B. subtilis* e *B. firmus* apontam reduções expressivas no número de galhas e ovos de *M. incognita* em tomate, algodão e alface, associadas ao aumento da biomassa da planta e do sistema radicular (Adam; Heuer; Hallmann, 2014).

Em alface, trabalhos brasileiros demonstram a eficiência de nematicidas biológicos e de inoculantes à base de *Bacillus* e de fungos nematófagos, como *Trichoderma* spp. e *Pochonia chlamydosporia*, na redução do fator de reprodução de *M. incognita* e do número de galhas, sem prejuízo ao desenvolvimento da cultura (Cavalcanti, 2022). Em estudos conduzidos com alface sob infestação por *Meloidogyne* spp., a aplicação de isolados de *Bacillus subtilis* promoveu redução significativa da população do nematoide e incremento no crescimento vegetal, evidenciando o potencial dessas bactérias como ferramentas de manejo biológico. Além do efeito direto sobre o patógeno, observou-se melhoria do desenvolvimento radicular e da biomassa das plantas, reforçando a contribuição desses microrganismos para sistemas de produção mais sustentáveis (Cavalcanti, 2022; Abd-Elgawad; Askary, 2020).

Fungos nematófagos também ocupam papel importante nesse contexto. Espécies de *Trichoderma* são capazes de parasitar ovos e juvenis, produzir enzimas como quitinases e proteases que degradam a cutícula e secretam compostos tóxicos que reduzem a mobilidade dos juvenis de segundo estágio (Harman *et al.*, 2004). Já *Pochonia chlamydosporia* se associa preferencialmente a massas de ovos, dificultando a eclosão e reduzindo o número de juvenis disponíveis para infectar novas raízes (Harman *et al.*, 2004). Em alguns sistemas, combinações de *Bacillus* com fungos nematófagos têm apresentado efeito aditivo ou sinérgico, reforçando o

potencial dos consórcios microbianos em programas de manejo integrado (Abd-Elgawad; Askary, 2020).

A adoção bem-sucedida do controle biológico depende da compatibilidade dos agentes com as condições de solo e clima, da forma de aplicação e da manutenção de um ambiente favorável à sua sobrevivência. Revisões recentes enfatizam que casos de baixa eficiência em campo geralmente estão associados a falhas de formulação, dose ou manejo, e não necessariamente a limitações intrínsecas dos microrganismos utilizados (Abd-Elgawad; Askary, 2020; Ayaz *et al.*, 2024). Por isso, o controle biológico tende a ser mais eficiente quando inserido em um contexto de manejo integrado, com solos biologicamente ativos e práticas culturais que favoreçam os organismos benéficos.

## 2.6 Quimiotaxia: Conceito e Relevância no Manejo de Nematoides

A quimiotaxia é o processo pelo qual organismos respondem de forma direcionada a gradientes de substâncias químicas presentes no ambiente. No caso de fitonematoides como *Meloidogyne spp.*, esse mecanismo exerce papel fundamental na localização das raízes hospedeiras. Os juvenis de segundo estágio (J2) utilizam compostos presentes nos exsudatos radiculares, incluindo aminoácidos, açúcares e ácidos orgânicos, como sinais químicos para orientar seu deslocamento no solo em direção às plantas hospedeiras (Čepulytė *et al.*, 2018).

Estudos demonstram que a composição química dos exsudatos radiculares pode influenciar diretamente a atração ou repelência de nematoides. Plantas resistentes frequentemente produzem compostos capazes de reduzir a atratividade ou interferir negativamente no comportamento de orientação dos juvenis, enquanto plantas suscetíveis tendem a liberar substâncias que favorecem a localização e a infecção radicular (Čepulytė *et al.*, 2018).

Além disso, microrganismos benéficos presentes na rizosfera podem modificar a composição dos exsudatos radiculares, alterando a resposta quimiotática dos nematoides. Essas alterações podem reduzir a atratividade das raízes, dificultando a localização do hospedeiro e contribuindo para o manejo biológico de *Meloidogyne spp.* (Forghani; Hajihassani, 2020).

Os resultados obtidos em diferentes estudos demonstram que a quimiotaxia desempenha papel central no processo de localização do hospedeiro por *Meloidogyne spp.* Dessa forma, estratégias capazes de modificar os sinais químicos presentes na rizosfera, incluindo a utilização de microrganismos benéficos e compostos voláteis produzidos por rizobactérias, podem contribuir para a redução da infecção radicular e complementar programas de manejo integrado de fitonematoides (Čepulytė *et al.*, 2018; Forghani; Hajihassani, 2020).

## 2.7 Potencial das Rizobactérias na Indução de Resistência Sistêmica em Plantas

As rizobactérias promotoras de crescimento vegetal (PGPRs), especialmente espécies do gênero *Bacillus*, podem atuar como importantes agentes de indução de resistência sistêmica em plantas. Esse mecanismo, denominado resistência sistêmica induzida (ISR), promove um estado fisiológico de alerta que permite respostas mais rápidas e eficientes diante do ataque de patógenos e pragas (Pieterse *et al.*, 2014).

A ISR está associada principalmente às vias de sinalização mediadas por ácido jasmônico e etileno, diferindo da resistência sistêmica adquirida (SAR), que está relacionada ao ácido salicílico. A ativação dessas vias resulta no fortalecimento das barreiras físicas e bioquímicas da planta, dificultando o estabelecimento de organismos fitopatogênicos (Pieterse *et al.*, 2014).

Além disso, espécies de *Bacillus* podem aumentar a atividade de enzimas antioxidantes, estimular a síntese de compostos fenólicos e favorecer a lignificação dos tecidos radiculares. Algumas bactérias também produzem ACC deaminase, enzima responsável pela redução dos níveis de etileno de estresse, contribuindo para maior crescimento radicular e tolerância das plantas a condições adversas (Glick, 2014).

## 2.8 Biofilmes e Colonização da Rizosfera

A capacidade de formar biofilmes é uma das principais características que conferem às rizobactérias do gênero *Bacillus* alta eficiência na colonização de raízes e na persistência no ambiente rizosférico. Biofilmes são estruturas organizadas de células microbianas embebidas em uma matriz extracelular composta por exopolissacarídeos, proteínas, lipídios e DNA extracelular. Essa matriz proporciona proteção contra estresses abióticos (variação de temperatura, pH, salinidade) e bióticos (competição, ação de antibióticos e predadores) (Beauregard *et al.*, 2013).

Na rizosfera, a formação de biofilmes por *Bacillus* spp. favorece a adesão às superfícies radiculares e a ocupação de nichos estratégicos próximos a pontos de exsudação. Isso permite a liberação contínua de compostos bioativos, incluindo lipopeptídeos com atividade antimicrobiana e nematicida, e sideróforos envolvidos na aquisição de ferro. Além disso, a formação de biofilmes aumenta a persistência e a eficiência da colonização radicular pelas

bactérias, contribuindo para a proteção das raízes contra organismos fitopatogênicos e fitonematoides (Li *et al.*, 2015; Mazzucelli *et al.*, 2020).

O fenômeno de *quorum sensing*, que é a comunicação química dependente da densidade celular, regula a formação de biofilmes e a produção de muitos metabólitos de interesse agrônomo. Em *Bacillus subtilis*, por exemplo, o aumento da densidade celular na rizosfera pode desencadear uma maior produção de surfactinas, fengicinas e iturinas, compostos com atividade comprovada contra fungos fitopatogênicos e com potencial efeito sobre nematoides (Ongena; Jacques, 2008). Dessa forma, biofilmes não apenas garantem a permanência dos microrganismos benéficos no solo, mas também aumentam a eficácia do controle biológico.

## 2.9 Compostos Voláteis Produzidos por *Bacillus* spp. e Seu Efeito Antagonista

As rizobactérias do gênero *Bacillus* produzem diversos compostos orgânicos voláteis de baixa massa molecular que se difundem na fase gasosa do solo e podem atuar sobre plantas e patógenos, mesmo estes estando distantes. Entre esses compostos estão álcoois, cetonas, aldeídos e ácidos orgânicos, além de moléculas nitrogenadas e enxofradas, com efeitos tanto na promoção de crescimento quanto na defesa das plantas (Ryu *et al.*, 2003).

Trabalhos clássicos demonstraram que voláteis de *B. subtilis* e *B. amyloliquefaciens* aumentam a biomassa de *Arabidopsis* e de culturas agrícolas, modulando a expressão de genes relacionados à fotossíntese, à expansão celular e à síntese de hormônios, em especial acetoin e 2,3-butanodiol (Ryu *et al.*, 2003). Revisões posteriores consolidaram o entendimento de que esses compostos podem, ao mesmo tempo, estimular o crescimento vegetal e ativar respostas de defesa, aproximando o conceito de promoção de crescimento da indução de resistência desencadeada por voláteis (Bitas *et al.*, 2013; Fincheira; Quiroz, 2018).

Ensaio com *M. incognita* mostram que esses voláteis podem reduzir a motilidade dos juvenis, prejudicar a eclosão dos ovos e diminuir a penetração nas raízes (Gu *et al.*, 2017; Ayaz *et al.*, 2021).

Estudos recentes com *B. velezensis* e outras espécies de *Bacillus* indicam que misturas de compostos voláteis contendo álcoois, pirazinas e cetonas apresentam forte atividade fumigante e repelente contra *Meloidogyne* spp., além de ativarem vias de sinalização relacionadas ao ácido jasmônico e ao etileno (Gao *et al.*, 2018; Fincheira e Quiroz, 2018).

Além dos efeitos promotores de crescimento, compostos voláteis produzidos por *Bacillus* spp. podem interferir no comportamento de nematoides fitoparasitas, reduzindo sua

mobilidade, comprometendo a eclosão de ovos e dificultando a localização das raízes hospedeiras (Xiang *et al.*, 2018).

## 2.10 Aplicações de Ferramentas Ômicas na Avaliação de Rizobactérias

Os avanços recentes em genômica, transcriptômica, proteômica e metabolômica têm ampliado significativamente a compreensão das interações entre rizobactérias, plantas e fitonematoides. Essas abordagens permitem investigar, em diferentes níveis biológicos, os mecanismos envolvidos na promoção de crescimento vegetal e no biocontrole de patógenos. No caso de espécies do gênero *Bacillus*, análises genômicas têm possibilitado a identificação de genes e agrupamentos biossintéticos responsáveis pela produção de lipopeptídeos, enzimas hidrolíticas, sideróforos e compostos orgânicos voláteis associados à colonização radicular, à promoção de crescimento e à supressão de organismos fitopatogênicos, incluindo nematoides do gênero *Meloidogyne* (Caulier *et al.*, 2019; Rabbee *et al.*, 2019).

As abordagens transcriptômicas e proteômicas também têm contribuído para o entendimento das respostas desencadeadas pela interação entre plantas, rizobactérias e nematoides. Estudos demonstram que a colonização radicular por espécies de *Bacillus* pode induzir a expressão de genes relacionados à resistência sistêmica induzida, ao metabolismo de compostos fenólicos, à lignificação da parede celular e à atividade de enzimas antioxidantes. Paralelamente, é possível detectar proteínas bacterianas envolvidas na formação de biofilmes, na colonização da rizosfera e na síntese de metabólitos bioativos importantes para o estabelecimento do biocontrole (Pieterse *et al.*, 2014; Backer *et al.*, 2018).

A metabolômica tem se mostrado particularmente relevante para compreender as alterações químicas que ocorrem na rizosfera em resposta à presença de microrganismos benéficos e de fitonematoides. Estudos demonstram que a colonização das raízes por rizobactérias pode modificar qualitativa e quantitativamente a composição dos exsudatos radiculares, influenciando diretamente os sinais químicos percebidos pelos nematoides no solo. Essas alterações podem afetar processos comportamentais, como a quimiotaxia e a localização do hospedeiro, reduzindo a eficiência de infecção por juvenis de segundo estágio (J2) de *Meloidogyne* spp. (Kihika *et al.*, 2017).

Estudos realizados por Kihika *et al.* (2017) e Čepulytė *et al.* (2018) demonstram que juvenis de segundo estágio de *Meloidogyne* spp. respondem de maneira altamente específica a compostos presentes nos exsudatos radiculares, incluindo aminoácidos, açúcares, ácidos orgânicos e compostos voláteis. A composição dessas misturas químicas pode determinar tanto

a atração quanto a repulsão dos nematoides, influenciando diretamente o sucesso do processo de infecção. A integração de dados provenientes da genômica, transcriptômica, proteômica e metabolômica tem permitido a construção de modelos mais abrangentes dos mecanismos de ação de rizobactérias promotoras de crescimento vegetal. Essas abordagens integradas possibilitam relacionar a expressão de genes envolvidos na síntese de metabólitos antimicrobianos e compostos voláteis com as respostas fisiológicas das plantas e com as alterações químicas observadas na rizosfera. Além disso, contribuem para a identificação de marcadores moleculares e metabólicos que podem ser utilizados como indicadores da eficiência do biocontrole em diferentes condições ambientais e sistemas produtivos (Abd-Elgawad; Askary, 2020).

Paralelamente, a incorporação de ferramentas de agricultura de precisão tem ampliado as possibilidades de monitoramento dos efeitos de bioinsumos em campo. Tecnologias baseadas em sensores remotos, imagens obtidas por veículos aéreos não tripulados (VANTs) e índices de vegetação permitem acompanhar alterações no vigor das plantas e detectar precocemente estresses bióticos associados à ação de patógenos de solo. Em culturas de ciclo curto, como a alface, essas ferramentas apresentam potencial para complementar programas de manejo integrado de nematoides, fornecendo informações espaciais e temporais que auxiliam na tomada de decisão e na avaliação da eficiência de estratégias biológicas de controle (Zhang; Kovacs, 2012; Mahlein, 2016).

Dessa forma, a integração entre ferramentas ômicas e tecnologias de agricultura de precisão representa uma perspectiva promissora para o desenvolvimento de sistemas de manejo mais eficientes, sustentáveis e preditivos, permitindo compreender de forma mais abrangente as interações entre plantas, rizobactérias e fitonematoides, bem como otimizar o uso de agentes biológicos no controle de *Meloidogyne* spp.

## **2.11 Parâmetros fisiológicos (SPAD, Prolina e SOD)**

Os parâmetros fisiológicos são amplamente utilizados em estudos com plantas para avaliar o estado metabólico, nutricional e as respostas a diferentes tipos de estresse biótico e abiótico. Esses indicadores permitem compreender como as plantas reagem a fatores adversos, como deficiência hídrica, ataques de patógenos e nematoides ou desequilíbrios nutricionais. Entre os principais parâmetros utilizados em análises fisiológicas destacam-se o índice SPAD, o teor de prolina e a atividade da enzima superóxido dismutase (SOD), que fornecem informações relevantes sobre o funcionamento do aparato fotossintético, os mecanismos de

proteção osmótica e os sistemas antioxidantes das plantas (Taiz *et al.*, 2017; Hasanuzzaman *et al.*, 2020).

O índice SPAD corresponde a uma medida indireta do teor de clorofila presente nas folhas, obtida por meio de clorofilômetros portáteis que estimam a intensidade da coloração verde foliar. A concentração de clorofila está diretamente associada à capacidade fotossintética e ao estado nutricional da planta, especialmente ao nitrogênio, elemento essencial para a síntese desse pigmento. Assim, valores mais elevados de SPAD geralmente indicam maior teor de clorofila e melhor desempenho fisiológico, enquanto valores reduzidos podem refletir deficiência nutricional ou estresse fisiológico (Minolta, 1989; Argenta *et al.*, 2001).

A prolina é um aminoácido que se acumula nos tecidos vegetais quando as plantas são submetidas a condições de estresse, como seca, salinidade, temperaturas extremas ou ataque de patógenos. Esse composto atua como osmoprotetor, contribuindo para a manutenção da integridade celular, estabilização de proteínas e membranas e regulação do equilíbrio osmótico. Dessa forma, o acúmulo de prolina é amplamente utilizado como indicador bioquímico da intensidade do estresse sofrido pelas plantas (Bates; Waldren; Teare, 1973; Ashraf; Foolad, 2007).

A superóxido dismutase (SOD) é uma enzima antioxidante fundamental para o sistema de defesa vegetal contra espécies reativas de oxigênio (EROs), produzidas em maiores concentrações durante situações de estresse. A SOD catalisa a dismutação do radical superóxido em peróxido de hidrogênio e oxigênio molecular, reduzindo os danos oxidativos às células vegetais. Por essa razão, a atividade dessa enzima é frequentemente utilizada como indicador da capacidade antioxidante das plantas diante de condições adversas (Alscher; Erturk; Heath, 2002; Gill; Tuteja, 2010).

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Obtenção, Identificação e Multiplicação de *Meloidogyne* spp.

Uma população de *Meloidogyne* incognita foi mantida na coleção de nematoides do Laboratório de Nematologia do Departamento de Fitopatologia da Universidade Federal de Lavras (UFLA), em Lavras, Minas Gerais. Essa população foi multiplicada em plantas de tomateiro (*Solanum lycopersicum*) cultivar Santa Clara, amplamente utilizada como hospedeira para manutenção de populações de nematoides-das-galhas devido à sua elevada suscetibilidade e capacidade de proporcionar alta reprodução do patógeno (Taylor; Sasser, 1978; Hussey; Janssen, 2002).

A identificação da espécie foi realizada por análise molecular, utilizando metodologias amplamente empregadas para caracterização de espécies de *Meloidogyne*. Para isso, fêmeas adultas foram coletadas de raízes infectadas e submetidas à extração de DNA genômico, conforme protocolos adaptados para nematoides fitoparasitas de pequeno porte, baseados em lise celular e posterior obtenção do material genético (Randig *et al.*, 2002).

A identificação de *M. incognita* foi conduzida por meio da amplificação de regiões específicas do DNA utilizando marcadores moleculares do tipo SCAR (Sequence Characterized Amplified Region), específicos para a espécie. As reações de PCR foram preparadas contendo tampão de reação, MgCl<sub>2</sub>, dNTPs, primers específicos, Taq DNA polimerase e DNA molde. As condições de amplificação seguiram protocolos previamente estabelecidos para a diferenciação molecular de espécies do gênero *Meloidogyne*, incluindo etapas de desnaturação inicial, ciclos de desnaturação, anelamento e extensão, seguidos de uma etapa final de extensão (Zijlstra; Donkers-Venne; Fargette, 2000).

Os produtos amplificados foram submetidos à eletroforese em gel de agarose, corado com agente intercalante apropriado e visualizado sob luz ultravioleta. A presença de fragmentos com tamanho compatível com o esperado para os marcadores utilizados confirmou a identidade da população como *M. incognita*, assegurando a pureza da população empregada nos experimentos (Zijlstra; Donkers-Venne; Fargette, 2000).

Após a confirmação molecular da espécie, ovos de *M. incognita* foram utilizados para a inoculação de plantas de tomateiro cultivar Santa Clara, cultivadas em vasos plásticos com capacidade para 10 L contendo substrato comercial esterilizado (Tropstrato HA Hortaliças®). As plantas foram mantidas em casa de vegetação sob temperatura variando entre 25 e 28 °C, umidade relativa entre 60 e 80% e fotoperíodo aproximado de 12 horas de luz, condições favoráveis ao desenvolvimento das plantas e à reprodução dos nematoides-das-galhas.

Decorridos aproximadamente 90 dias após a inoculação, as raízes infectadas foram coletadas para a extração de ovos e juvenis de segundo estágio (J2). A extração foi realizada de acordo com a metodologia proposta por Bonetti e Ferraz (1981), amplamente utilizada para obtenção de inóculo de *Meloidogyne* spp. em experimentos conduzidos em condições controladas.

Para a obtenção dos ovos, as raízes infectadas foram cuidadosamente lavadas em água corrente para remoção do substrato aderido e posteriormente cortadas em segmentos de aproximadamente 1 a 2 cm de comprimento. Em seguida, os fragmentos radiculares foram submetidos à trituração em liquidificador, na menor rotação, durante 20 segundos, na presença de solução de hipoclorito de sódio a 0,5%, procedimento que promove a dissolução parcial da matriz gelatinosa e a liberação dos ovos presentes no interior das galhas sem comprometer significativamente sua viabilidade (Bonetti; Ferraz, 1981).

A suspensão obtida foi vertida sobre um conjunto de peneiras de 200 e 500 mesh. O material retido na peneira de 500 mesh, constituído predominantemente por ovos e juvenis de segundo estágio, foi coletado e utilizado para o preparo da suspensão de inóculo (Bonetti; Ferraz, 1981).

A concentração de ovos foi determinada utilizando lâmina de Peters sob microscópio fotônico com aumento de 100×. Foram realizadas contagens em alíquotas conhecidas da suspensão, permitindo o ajuste da concentração para a densidade desejada de inóculo.

A inoculação foi realizada em plantas de tomateiro cultivadas em vasos, mediante a aplicação de 5 mL da suspensão padronizada em quatro orifícios equidistantes ao redor do caule, a aproximadamente 3 cm de profundidade. Esse procedimento possibilitou a distribuição uniforme do inóculo na região da rizosfera, favorecendo a penetração dos juvenis nas raízes e o estabelecimento da infecção.

### **3.2 Origem dos Isolados Bacterianos**

Foram utilizados 12 isolados bacterianos previamente cadastrados e preservados na Coleção de Culturas de Microbiologia Agrícola (CCMA), vinculada ao Laboratório de

Fisiologia e Genética de Microrganismos, do Programa de Pós-Graduação em Microbiologia Agrícola da UFLA, em Lavras, Minas Gerais.

A identificação dos isolados bacterianos foi realizada previamente no âmbito da Coleção de Culturas de Microbiologia Agrícola (CCMA), por meio da integração de características morfológicas, fisiológicas e bioquímicas, associadas à identificação molecular baseada na análise da sequência do gene do RNA ribossomal 16S. Inicialmente, os isolados foram caracterizados quanto à morfologia das colônias, coloração de Gram e testes bioquímicos padrão. Posteriormente, a confirmação taxonômica foi realizada por meio da amplificação do gene 16S rRNA via reação em cadeia da polimerase (PCR), seguida do sequenciamento e comparação das sequências obtidas com aquelas depositadas em bancos de dados públicos, como o GenBank, utilizando ferramentas de alinhamento e análise filogenética. A identificação ao nível de gênero e, quando possível, de espécie, permitiu o cadastramento e a preservação dos isolados na CCMA para uso em estudos de promoção de crescimento vegetal e biocontrole de fitopatógenos.

Os isolados foram obtidos a partir de diferentes ambientes, incluindo frutos do Cerrado, fermentações de azeitonas de mesa, café despulpado em fermentação via úmida e água residuária da cadeia produtiva do café. Essa diversidade de origens conferiu ao conjunto de isolados um amplo espectro de características fisiológicas e metabólicas, potencialmente relevantes para a promoção de crescimento vegetal e para o biocontrole de fitonematoides.

Abaixo estão descritos os isolados utilizados, a amostra correspondente e seus respectivos locais de coleta:

Quadro 1 - Informações sobre os isolados utilizados.

(Continua)

| Isolados | Amostra                                | Local de coleta                                                                   |
|----------|----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| 1        | CCMA 0085 – <i>Bacillus subtilis</i>   | Arcos- MG / Fruto (Cerrado) Marolo                                                |
| 2        | CCMA 0089 – <i>B. methylotrophicus</i> | Arcos- MG / Fruto (Cerrado) Marolo                                                |
| 3        | CCMA 1785 - <i>B. velezensis</i>       | Fazenda Experimental EPAMIG-Maria da Fé- MG<br>/ Fermentação de azeitonas de mesa |
| 4        | CCMA 0119 – <i>B. thuringiensis</i>    | Luminárias -MG / Fruto (Cerrado) Azeitona -de -<br>mato                           |
| 5        | CCMA 0079 – <i>B. pumilus</i>          | Arcos – MG / Fruto (Cerrado) Arrebenta - boi                                      |

Quadro 1 - Informações sobre os isolados utilizados.

(Conclusão)

|    |                                          |                                                                                |
|----|------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| 6  | CCMA 1779 – <i>B. cereus</i>             | Fazenda Experimental EPAMIG-Maria da Fé- MG / Fermentação de azeitonas de mesa |
| 7  | CCMA 1216 – <i>B. simplex</i>            | Fazenda Daterra, Patrocínio – MG / Café despulpado, fermentação via úmida      |
| 8  | CCMA 0078 – <i>Pseudomonas putida</i>    | Passos - MG / Fruto (Cerrado) Bejuco colorado                                  |
| 9  | CCMA 0106 – <i>P. aeruginosa</i>         | Luminárias – MG / Fruto (Cerrado) Muxiba                                       |
| 10 | CCMA 1270 – <i>Enterobacter asburiae</i> | Fazenda Daterra, Patrocínio – MG / Café despulpado, fermentação via úmida      |
| 11 | CCMA 1010 – <i>Serratia marcescens</i>   | Fazenda Daterra Coffee, Patrocínio – MG / Água residuária do café              |
| 12 | CCMA 975 – <i>Sphingomonas</i> sp.       | Fazenda Daterra Coffee, Patrocínio – MG / Água residuária do café              |

Fonte: Da autora (2026)

### 3.3 Manutenção dos Isolados Bacterianos

Os isolados bacterianos foram mantidos em condições que garantiram sua viabilidade e estabilidade ao longo do período experimental. Para utilização em curto prazo, as culturas foram repicadas periodicamente em meio ágar nutriente e armazenadas sob refrigeração a 4 °C, procedimento amplamente empregado para manutenção temporária de bactérias em coleções microbiológicas (Cappuccino; Sherman, 2014; Madigan *et al.*, 2021).

Para a preservação a longo prazo, os isolados foram transferidos para tubos contendo solução de glicerol a 20% (v/v) e armazenados sob congelamento em temperaturas inferiores a -20 °C. O uso de glicerol como agente crioprotetor reduz os danos celulares causados pela formação de cristais de gelo durante o congelamento, contribuindo para a manutenção da viabilidade e estabilidade genética das culturas ao longo do armazenamento (Hubálek, 2003). Esse procedimento é amplamente adotado em laboratórios de microbiologia por permitir a recuperação confiável dos isolados e minimizar perdas decorrentes de contaminações ou alterações fisiológicas das culturas (Madigan *et al.*, 2021).

### **3.4 Avaliação dos Isolados Quanto à Produção de Compostos Relacionados ao Biocontrole e Promoção do Crescimento**

#### **3.4.1 Hidrólise de Amido**

A capacidade amilolítica dos isolados bacterianos foi avaliada por meio do ensaio de hidrólise de amido em meio sólido. Para isso, os isolados foram inoculados em placas de Petri contendo meio de cultura suplementado com amido solúvel a 0,2% e pH ajustado para 7,0, seguindo metodologias clássicas utilizadas para a detecção qualitativa de enzimas extracelulares produzidas por microrganismos (Hankin; Anagnostakis, 1975; Cappuccino; Sherman, 2014).

Após o período de incubação, foi adicionada à superfície das placas uma solução de Lugol, permitindo a visualização das regiões onde o amido permaneceu intacto. A formação de halos claros ao redor das colônias foi interpretada como evidência da degradação do amido pela ação de amilases extracelulares produzidas pelos isolados bacterianos (Cappuccino; Sherman, 2014).

A intensidade da atividade amilolítica foi classificada por meio de uma escala de notas adaptada de Cavalcanti (2022), sendo atribuída nota 0 para ausência de halo de hidrólise; nota 1 para halos com raio de até 10 mm; nota 2 para halos entre 11 e 20 mm; e nota 3 para halos com raio superior a 21 mm.

#### **3.4.2 Solubilização de Fosfatos**

A capacidade de solubilização de fosfato de cálcio pelos isolados bacterianos foi avaliada utilizando o meio NBRIP (National Botanical Research Institute's Phosphate growth medium), desenvolvido especificamente para o isolamento e a seleção de microrganismos solubilizadores de fosfato insolúvel (Nautiyal, 1999). O meio foi preparado com pH ajustado para 6,0 e distribuído em placas de Petri. Os isolados foram inoculados na superfície do meio sólido e incubados em ambiente escuro a 28 °C. As avaliações foram realizadas aos 7, 14 e 21 dias após a inoculação.

A formação de halos claros ao redor das colônias foi considerada indicativa da solubilização de fosfato de cálcio insolúvel, processo geralmente associado à produção de ácidos orgânicos, à redução do pH do meio e à atividade de enzimas fosfatases produzidas pelos microrganismos (Rodríguez; Fraga, 1999).

A eficiência de solubilização foi classificada com base no tempo necessário para o aparecimento dos halos de solubilização, conforme adaptação proposta por Cavalcanti (2022).

Isolados que apresentaram halo apenas aos 21 dias foram classificados como de baixa eficiência; aqueles que formaram halos a partir dos 14 dias foram considerados de eficiência intermediária; e os que apresentaram halos já aos 7 dias foram classificados como de alta eficiência.

### 3.4.3 Hidrólise de Quitina

A atividade quitinolítica dos isolados bacterianos foi avaliada utilizando meio de cultura suplementado com quitina a 0,5% como única fonte de carbono, metodologia amplamente empregada para a seleção e caracterização de microrganismos produtores de quitinases (Hsu; Lockwood, 1975; Chernin *et al.*, 1995). Os isolados foram inoculados em placas de Petri contendo o meio sólido e incubados em ambiente escuro a 28 °C durante 21 dias.

As avaliações foram realizadas aos 7, 14 e 21 dias após a inoculação. A produção de quitinases foi determinada pela observação da formação de halos translúcidos ao redor das colônias bacterianas, indicativos da degradação da quitina presente no meio de cultura pela ação enzimática dos microrganismos (Chernin *et al.*, 1995; Chet; Inbar, 1994).

A eficiência da atividade quitinolítica foi classificada com base no tempo necessário para o aparecimento dos halos de hidrólise, conforme adaptação metodológica proposta por Cavallanti (2022). Isolados que apresentaram halo apenas aos 21 dias foram classificados como de baixa eficiência; aqueles que formaram halo aos 14 dias foram considerados de eficiência intermediária; e os que apresentaram halo já aos 7 dias foram classificados como de alta eficiência.

### 3.4.4 Atividade de ACC Deaminase

A atividade da enzima 1-aminociclopropano-1-carboxilato (ACC) deaminase foi avaliada por meio de metodologia baseada nos procedimentos descritos por Penrose e Glick (2003). Essa enzima desempenha importante papel na promoção do crescimento vegetal por catalisar a degradação do ACC, precursor imediato da biossíntese de etileno, reduzindo os níveis desse hormônio vegetal frequentemente associado a respostas de estresse e processos de senescência (Glick, 2014).

Os isolados bacterianos foram previamente cultivados e posteriormente transferidos para meio mínimo de sais suplementado com ACC como única fonte de nitrogênio, conforme metodologia proposta por Penrose e Glick (2003). Após incubação a 28 °C por 24 horas, as

células bacterianas foram coletadas por centrifugação, lavadas e ressuspensas em tampão apropriado para a determinação da atividade enzimática.

A atividade da ACC deaminase foi quantificada com base na quantidade de  $\alpha$ -cetobutirato produzida a partir da degradação do ACC pela enzima. Para isso, foi empregada reação colorimétrica utilizando 2,4-dinitrofenilhidrazina (DNPH), seguida de leitura da absorbância em espectrofotômetro a 540 nm. Os resultados foram expressos em nmol de  $\alpha$ -cetobutirato por miligrama de proteína por hora, conforme descrito por Penrose e Glick (2003).

### 3.4.5 Ensaio de Quimiotaxia *In Vitro*

O efeito dos isolados bacterianos sobre a movimentação de juvenis de segundo estágio (J2) de *Meloidogyne incognita* foi avaliado por meio de ensaio de quimiotaxia em placas de ágar, adaptado de metodologias utilizadas para estudos de comportamento e orientação de nematoides fitoparasitas (Tsai *et al.*, 2021). Para isso, placas de Petri com 6 cm de diâmetro foram preparadas contendo 10 mL de ágar-água a 2%, formando uma superfície adequada para a locomoção dos juvenis.

Cada placa recebeu aproximadamente 150 juvenis de segundo estágio depositados na região central. A uma distância de 2 cm do ponto de inoculação foram demarcadas duas áreas opostas: uma área teste, na qual foram aplicados 10  $\mu$ L da suspensão bacteriana, e uma área controle, que recebeu igual volume de solução aquosa estéril. As placas foram mantidas em ambiente escuro, à temperatura ambiente, durante 16 horas, permitindo a difusão dos compostos produzidos pelos isolados bacterianos e a movimentação dos nematoides em resposta aos estímulos químicos presentes.

Ao término do período de incubação, foi realizada a contagem dos juvenis presentes nas áreas teste e controle. A resposta quimiotóxica foi expressa por meio do índice de quimiotaxia (IQ), calculado pela equação:

$$IQ = \frac{(\text{n}^\circ \text{ de J2s na área teste} - \text{n}^\circ \text{ de J2s na área controle})}{(\text{n}^\circ \text{ de J2s na área teste} + \text{n}^\circ \text{ de J2s na área controle})}$$

Esse índice permite quantificar a intensidade e a direção da resposta comportamental dos nematoides aos estímulos químicos avaliados, sendo amplamente utilizado em estudos de quimiotaxia de nematoides (Tsai *et al.*, 2021).

Valores positivos de IQ indicam atração dos juvenis ao estímulo testado, enquanto valores negativos indicam repulsão. Valores próximos de zero sugerem ausência de resposta direcional. Para fins de interpretação dos resultados, foram adotadas as seguintes classes: valores iguais ou superiores a 0,2 foram considerados altamente atrativos; valores entre 0,1 e 0,2 foram considerados levemente atrativos; valores entre -0,1 e 0,1 indicaram resposta neutra; valores entre -0,2 e -0,1 foram classificados como levemente repelentes; e valores iguais ou inferiores a -0,2 foram considerados altamente repelentes. Essa classificação foi adaptada de Cavalvanti (2022). O ensaio foi conduzido em duas etapas independentes.

Como controles positivos, foram utilizados exsudatos radiculares de tomateiro (*Solanum lycopersicum* L.), espécie amplamente reconhecida como hospedeira suscetível de *Meloidogyne* spp., além de compostos descritos na literatura como atrativos quimiotáticos para juvenis de segundo estágio, incluindo ácido málico e glicose, moléculas frequentemente encontradas em exsudatos radiculares e associadas à orientação de nematoides em direção ao hospedeiro (Kihika *et al.*, 2017; Čepulytė *et al.*, 2018).

Como controle negativo, foram utilizadas placas contendo apenas solução aquosa estéril tanto na área teste quanto na área controle, permitindo avaliar a movimentação espontânea dos juvenis na ausência de estímulos químicos direcionais.

### 3.5 Condução de Experimentos em Casa de Vegetação

Os experimentos foram conduzidos em casa de vegetação da Universidade Federal de Lavras (UFLA), Lavras, Minas Gerais, em estrutura adaptada e vedada para estudos com fitonematoides. Em ambos os ensaios foram utilizadas mudas comerciais de alface (*Lactuca sativa* L.), cultivar Regina, produzidas em bandejas de poliestireno e transplantadas aos 14 dias após a germinação, apresentando de três a quatro folhas verdadeiras. O sistema de cultivo consistiu em vasos com capacidade para 3 L, preenchidos com substrato comercial Tropstrato HA Hortaliças®.

A preparação dos isolados bacterianos foi padronizada para ambos os experimentos. Os microrganismos foram cultivados em meio líquido Luria-Bertani (LB), amplamente utilizado para o crescimento de bactérias heterotróficas e incubados sob agitação constante a 28 °C durante 24 horas. A concentração celular foi ajustada com base na densidade óptica medida a 600 nm (OD600), até atingir valor aproximado de 0,5, correspondente a cerca de 10<sup>8</sup> unidades formadoras de colônia por mililitro (UFC mL<sup>-1</sup>), conforme procedimentos microbiológicos de

quantificação celular amplamente utilizados na literatura (Cappuccino; Sherman, 2014; Madigan *et al.*, 2021).

### **3.5.1 Experimento 1: Avaliação do controle biológico de *incognita***

Este ensaio teve como objetivo avaliar o potencial dos isolados bacterianos no controle do nematoide-das-galhas. Os tratamentos consistiram na aplicação de 12 isolados (*Bacillus subtilis*, *B. methylophilus*, *B. velezensis*, *B. thuringiensis*, *B. pumilus*, *B. cereus*, *B. simplex*, *Pseudomonas putida*, *P. aeruginosa*, *Enterobacter asburiae*, *Serratia marcescens* e *Sphingomonas* sp.), um controle positivo (produto comercial Biomagno®) e um controle negativo (água).

A inoculação de *M. incognita* ocorreu sete dias após o transplante das mudas. Foram aplicados 5.000 ovos por planta, diretamente no substrato, em pequenas cavidades próximas ao sistema radicular, que foram posteriormente cobertas. A obtenção dos ovos seguiu os protocolos descritos no item 3.1. A aplicação das suspensões bacterianas (10 mL/planta) foi realizada via irrigação na região radicular, três dias após o transplante das mudas.

### **3.5.2 Experimento 2: Avaliação da promoção de crescimento vegetal**

O segundo ensaio foi conduzido para avaliar o efeito dos isolados bacterianos no crescimento das plantas de alface na ausência do patógeno. As condições de cultivo, tipo de vaso, substrato e preparação das suspensões bacterianas seguiram os mesmos critérios adotados no experimento anterior.

Neste experimento, os tratamentos bacterianos foram aplicados três dias após o transplante das mudas, também em volume de 10 mL por planta, por meio de irrigação da região radicular. Foram mantidos os mesmos grupos experimentais (12 isolados, controle positivo e controle negativo) para comparar a performance de crescimento das plantas inoculadas com as bactérias em comparação ao grupo controle (água).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

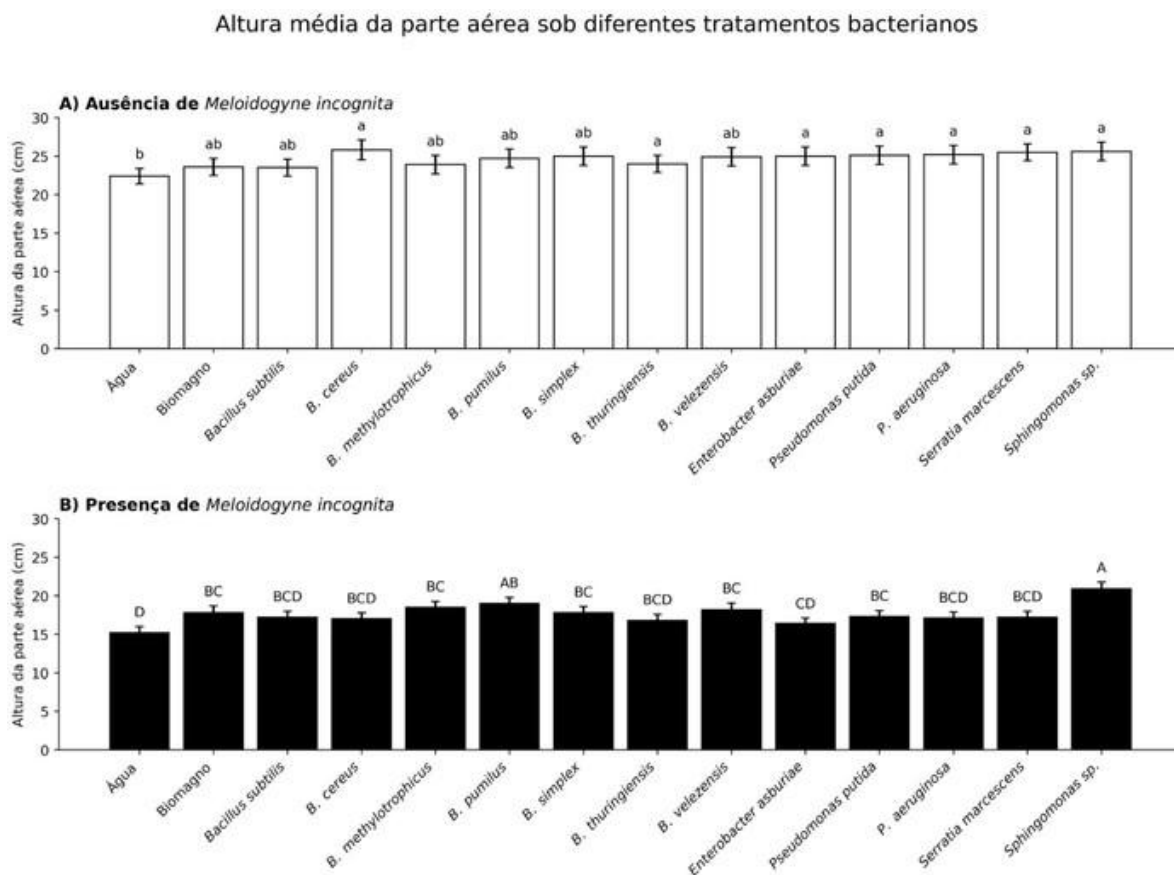
### 4.1 Crescimento vegetativo

A inoculação de *Meloidogyne incognita* comprometeu o crescimento das plantas de alface, reduzindo a altura, a biomassa e o desenvolvimento vegetativo, comportamento frequentemente observado em hospedeiros suscetíveis. A redução da altura, do diâmetro do caule, da massa fresca e do comprimento radicular observada no tratamento controle inoculado confirma os efeitos negativos do nematoide sobre o sistema radicular, uma vez que a formação de galhas interfere na absorção de água e nutrientes e compromete o transporte de assimilados na planta (Moens; Perry; Starr, 2009). Resultados semelhantes têm sido relatados para alface, tomateiro e outras hortaliças suscetíveis, nas quais a infecção por *Meloidogyne* spp. promove alterações fisiológicas que resultam em redução do crescimento e da produtividade.

Diversos estudos demonstram que rizobactérias promotoras de crescimento vegetal, especialmente espécies do gênero *Bacillus*, são capazes de estimular o desenvolvimento das plantas por meio da produção de fitormônios, da melhoria da absorção de nutrientes e da indução de respostas fisiológicas que favorecem o crescimento vegetal mesmo sob condições de estresse biótico (Vessey, 2003; Kloepper; Ryu; Zhang, 2004; Backer *et al.*, 2018). Entre os mecanismos envolvidos destacam-se a produção de auxinas, citocininas e outros metabólitos que promovem o alongamento celular e o desenvolvimento da parte aérea.

Os resultados obtidos no presente estudo (Figura 1) corroboram essas observações, uma vez que as plantas tratadas com os isolados de *Pseudomonas putida* e *Sphingomonas* sp. apresentaram médias de altura superiores às observadas no controle infectado. Esse comportamento sugere que os efeitos promotores de crescimento exercidos pelas bactérias contribuíram para minimizar os impactos negativos causados pelo parasitismo de *M. incognita*, favorecendo a manutenção do desenvolvimento vegetativo das plantas.

Figura 1 – Altura média das plantas (cm) sob diferentes tratamentos com bactérias, na presença e na ausência de *M. incognita*. Médias seguidas de letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ) sendo as letras minúsculas para o experimento na ausência de nematoide e as letras maiúsculas para o experimento na presença do nematoide.

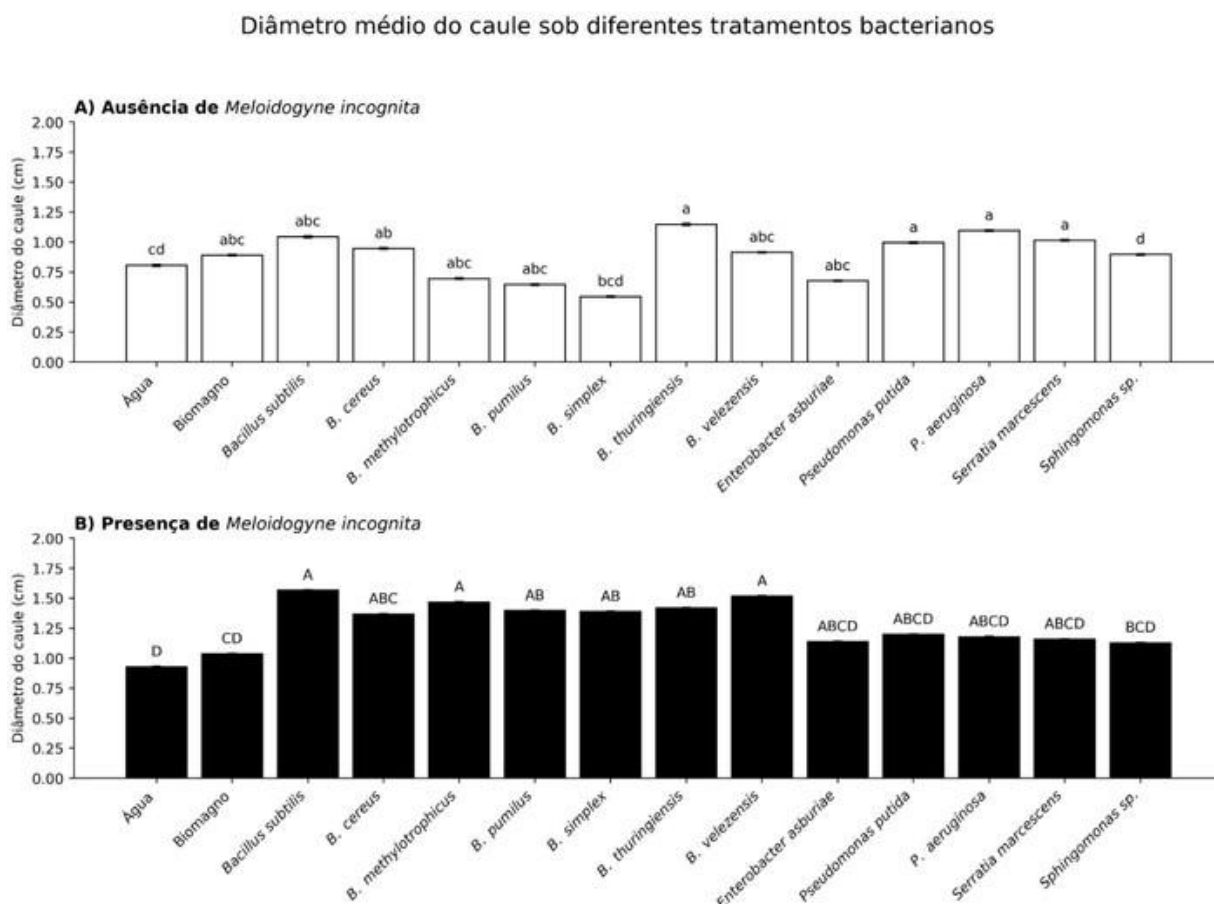


Fonte: Da autora (2026).

O diâmetro do caule constitui um importante indicador do vigor vegetativo, estando relacionado à capacidade de sustentação da planta e ao desenvolvimento dos tecidos vasculares responsáveis pelo transporte de água, nutrientes e fotoassimilados (Taiz *et al.*, 2017). Em situações de estresse radicular, como aquelas provocadas por nematoides-das-galhas, alterações na estrutura e no funcionamento do sistema radicular podem refletir negativamente sobre o crescimento do caule e sobre o desenvolvimento geral da planta.

Os resultados observados no presente estudo (Figura 2) demonstram que a aplicação dos isolados bacterianos contribuiu para a manutenção do diâmetro do caule quando comparada ao tratamento inoculado apenas com *M. incognita*. Esses resultados reforçam a hipótese de que os microrganismos avaliados atuaram na mitigação dos efeitos deletérios causados pelo nematoide, favorecendo a manutenção do crescimento vegetativo e da integridade estrutural das plantas.

Figura 2 – Diâmetro médio do caule (cm) das plantas sob diferentes tratamentos com bactérias, na presença e na ausência de *M. incognita*. Médias seguidas de letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ) sendo as letras minúsculas para o experimento na ausência de nematoide e as letras maiúsculas para o experimento na presença do nematoide.



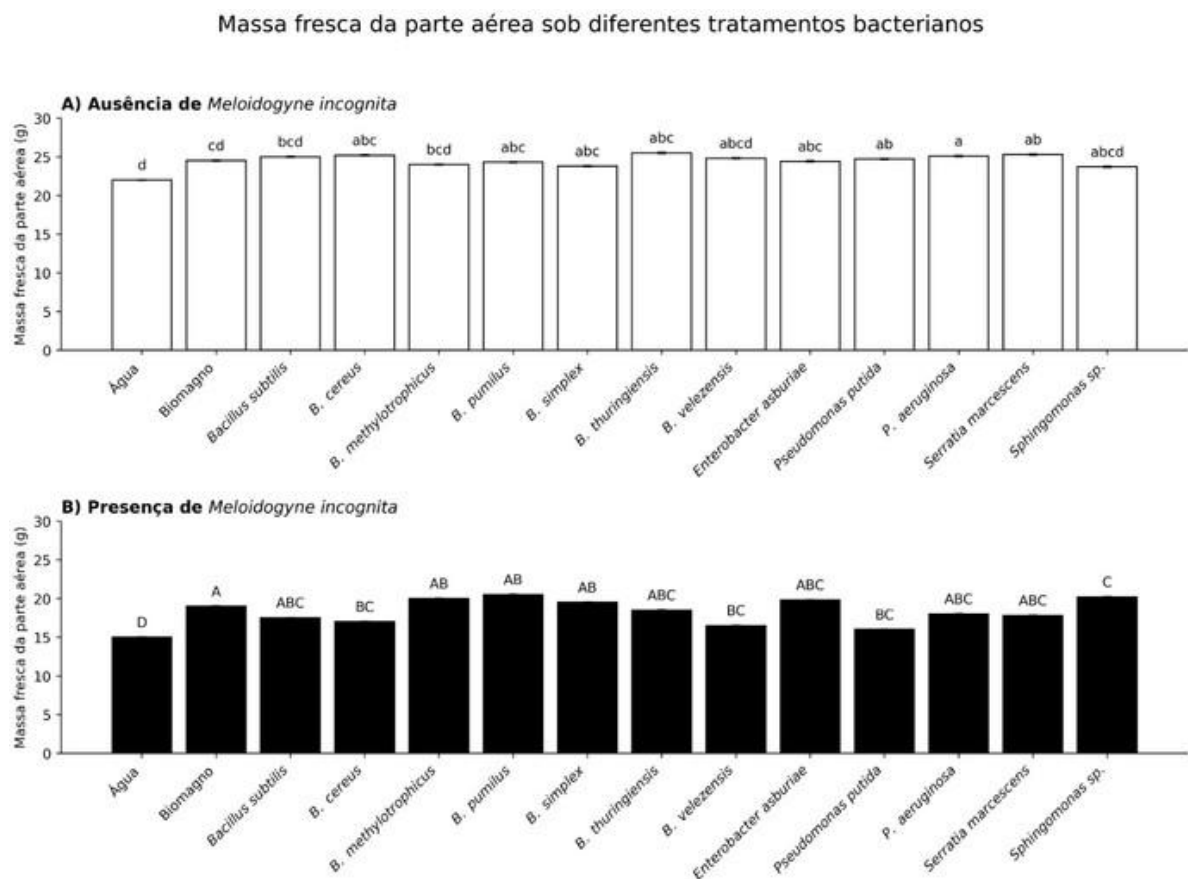
Fonte: Da autora (2026).

A produção de biomassa fresca da parte aérea está diretamente relacionada à eficiência do sistema radicular na absorção de água e nutrientes, processo frequentemente comprometido pela infecção por nematoides-das-galhas. A formação de galhas provoca alterações anatômicas e fisiológicas nas raízes, reduzindo a capacidade de absorção e translocação de recursos para a parte aérea da planta (Moens; Perry; Starr, 2009). Em alface e outras hortaliças suscetíveis, a infecção por *Meloidogyne* spp. tem sido associada à redução significativa da biomassa e do rendimento comercial das plantas (Charchar; Moita, 2005).

Os resultados obtidos no presente estudo (Figura 3) corroboram essas observações, uma vez que as plantas tratadas com os isolados bacterianos apresentaram maiores valores de massa fresca da parte aérea em comparação ao controle inoculado apenas com o nematoide. Esse

comportamento sugere que a colonização bacteriana contribuiu para a manutenção da funcionalidade do sistema radicular, favorecendo a absorção de água e nutrientes e, consequentemente, o desenvolvimento foliar das plantas.

Figura 3 – Massa fresca da parte aérea de plantas de alface em resposta aos tratamentos com bactérias, na presença e na ausência de *M. incognita*. Médias seguidas de letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ) sendo as letras minúsculas para o experimento na ausência de nematoide e as letras maiúsculas para o experimento na presença do nematoide.

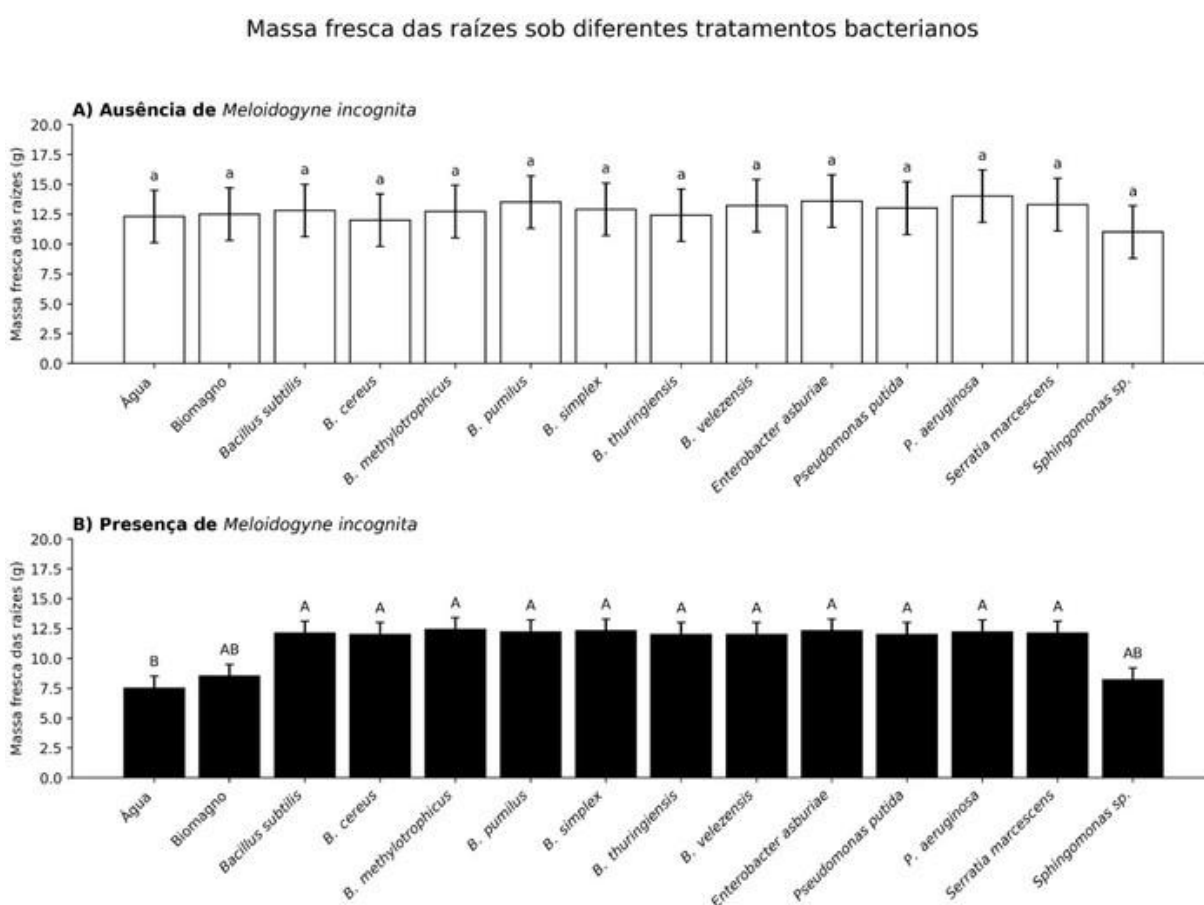


Fonte: Da autora (2026).

Em plantas infectadas por *Meloidogyne* spp., o aumento da massa fresca radicular nem sempre representa maior desenvolvimento do sistema radicular. Em muitos casos, esse incremento decorre da formação de galhas e da hipertrofia dos tecidos radiculares induzidas pelo parasitismo do nematoide. Essas alterações aumentam o peso das raízes, mas comprometem sua eficiência fisiológica e funcional (Moens; Perry; Starr, 2009).

Os resultados observados no presente estudo (Figura 4) estão de acordo com essas observações, uma vez que as plantas tratadas com os isolados bacterianos apresentaram sistemas radiculares visualmente mais saudáveis e menor incidência de galhas em comparação ao controle inoculado apenas com *M. incognita*. Dessa forma, a biomassa radicular observada nesses tratamentos está mais provavelmente associada ao desenvolvimento de raízes funcionais do que ao aumento de tecidos hipertrofiados provocados pelo nematoide.

Figura 4 – Massa fresca de raízes de plantas de alface em resposta aos tratamentos com bactérias, na presença e na ausência de *M. incognita*. Médias seguidas de letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ) sendo as letras minúsculas para o experimento na ausência de nematoide e as letras maiúsculas para o experimento na presença do nematoide.



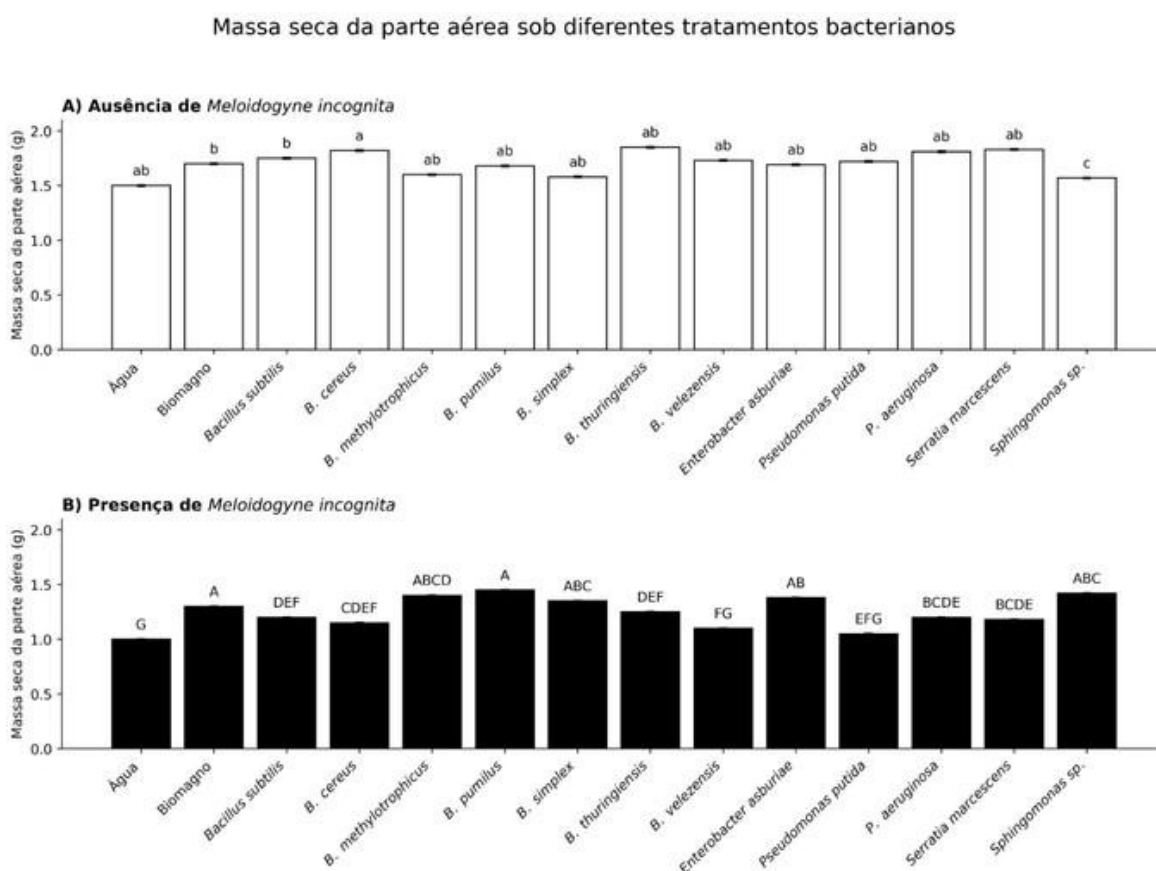
Fonte: Da autora (2026).

A produção de massa seca da parte aérea constitui um dos principais indicadores da capacidade fotossintética e do acúmulo de matéria orgânica pelas plantas. Em sistemas radiculares comprometidos por fitonematoides, a limitação na absorção de água e nutrientes reduz a taxa fotossintética e, consequentemente, a produção de biomassa seca (Taiz *et al.*, 2017;

Moens; Perry; Starr, 2009). Estudos conduzidos com alface infectada por *Meloidogyne* spp. relatam reduções significativas na produção de matéria seca em decorrência dos danos provocados pelo nematoide ao sistema radicular (Charchar; Moita, 2005).

Os resultados do presente estudo (Figura 5) corroboram essas evidências, uma vez que as plantas tratadas com isolados de *Bacillus* apresentaram maiores valores de massa seca da parte aérea em comparação ao controle infectado. Esses resultados sugerem que a inoculação bacteriana contribuiu para a manutenção da atividade fisiológica das plantas e para a redução dos efeitos negativos do parasitismo de *M. incognita*.

Figura 5 – Massa seca da parte aérea (g) de plantas de alface em resposta aos tratamentos com bactérias, na presença e na ausência de *M. incognita*. Médias seguidas de letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ) sendo as letras minúsculas para o experimento na ausência de nematoide e as letras maiúsculas para o experimento na presença do nematoide.



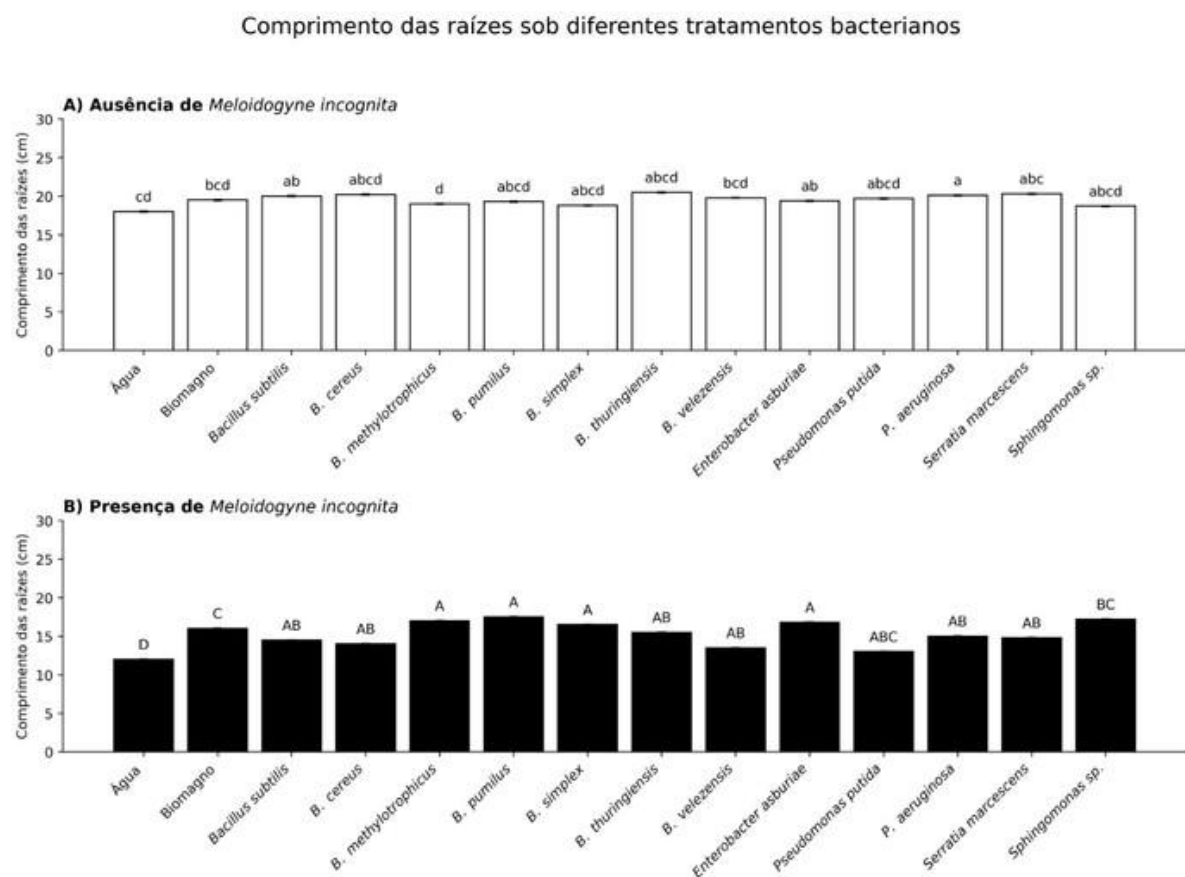
Fonte: Da autora (2026).

O comprimento radicular constitui uma característica fundamental para a exploração do solo e para a eficiência na absorção de água e nutrientes. O parasitismo por *Meloidogyne incognita* pode comprometer o crescimento apical das raízes, reduzindo seu alongamento e

alterando a arquitetura radicular em consequência da formação de células gigantes e galhas (Moens; Perry; Starr, 2009). Essas alterações frequentemente resultam em sistemas radiculares menos eficientes e com menor capacidade de exploração do solo.

Os resultados observados neste estudo (Figura 6) corroboram essas informações, uma vez que a inoculação dos isolados bacterianos promoveu maior comprimento radicular quando comparada ao tratamento inoculado apenas com o nematoide. Esse comportamento sugere que os microrganismos favoreceram o crescimento contínuo das raízes e contribuíram para minimizar os efeitos negativos do parasitismo, possibilitando maior desenvolvimento do sistema radicular mesmo sob a presença de *M. incognita*.

Figura 6 – Comprimento de raízes (cm) de plantas de alface em resposta aos tratamentos com bactérias, na presença e na ausência de *M. incognita*. Médias seguidas de letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ) sendo as letras minúsculas para o experimento na ausência de nematoide e as letras maiúsculas para o experimento na presença do nematoide.



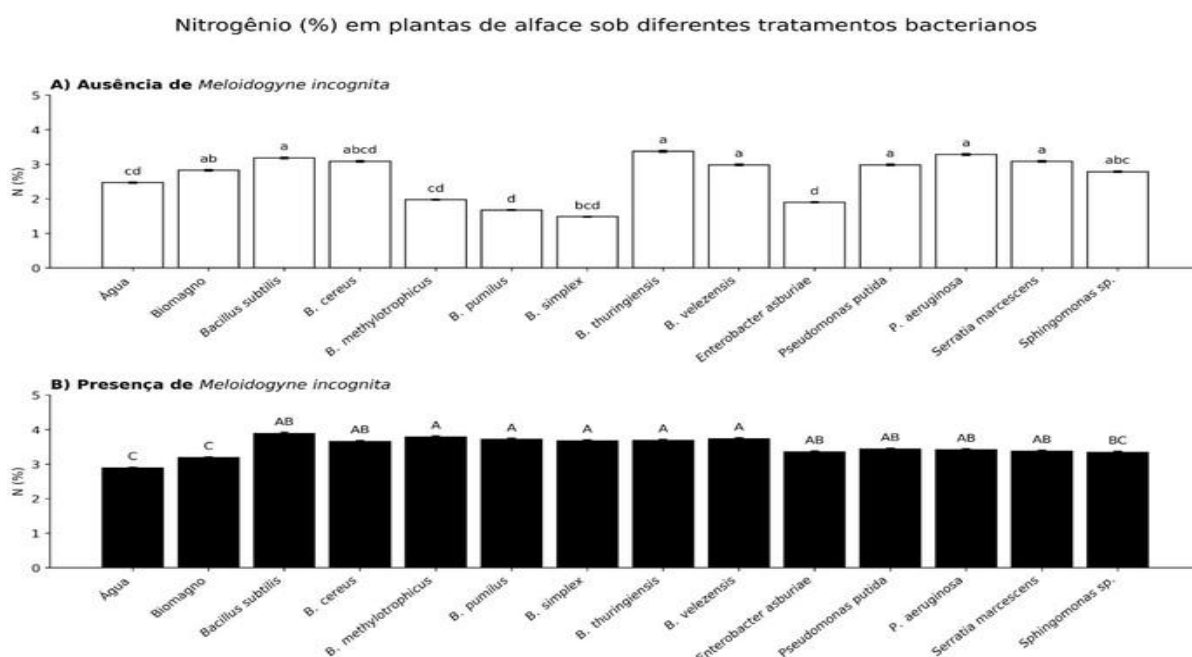
Fonte: Da autora (2026).

## 4.2 Nutrição mineral (N, P, K)

O teor foliar de nitrogênio constitui um importante indicador do estado nutricional das plantas, estando diretamente relacionado à síntese de proteínas, clorofila e compostos envolvidos no crescimento vegetal. Em plantas infectadas por nematoides-das-galhas, a absorção e o transporte de nutrientes são frequentemente comprometidos em decorrência das alterações fisiológicas e anatômicas induzidas no sistema radicular (Moens; Perry; Starr, 2009). Diversos estudos demonstram que rizobactérias promotoras de crescimento vegetal podem contribuir para a manutenção da nutrição nitrogenada das plantas por meio da fixação biológica de nitrogênio, da produção de fitormônios e da melhoria da absorção de nutrientes pelas raízes (Vessey, 2003; Backer *et al.*, 2018).

Os resultados obtidos no presente estudo (Figura 7) corroboram essas observações, uma vez que a infecção por *M. incognita* reduziu significativamente os teores foliares de nitrogênio no tratamento controle, enquanto plantas tratadas com *Sphingomonas* sp. apresentaram maiores concentrações desse nutriente. Esse comportamento sugere que a colonização bacteriana contribuiu para a manutenção da funcionalidade radicular e da absorção de nitrogênio, reduzindo os efeitos negativos provocados pelo parasitismo do nematoide.

Figura 7 – Teor foliar de nitrogênio (%) em folhas de alface em resposta aos tratamentos com bactérias, na presença e na ausência de *M. incognita*. Médias seguidas de letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ) sendo as letras minúsculas para o experimento na ausência de nematoide e as letras maiúsculas para o experimento na presença do nematoide.

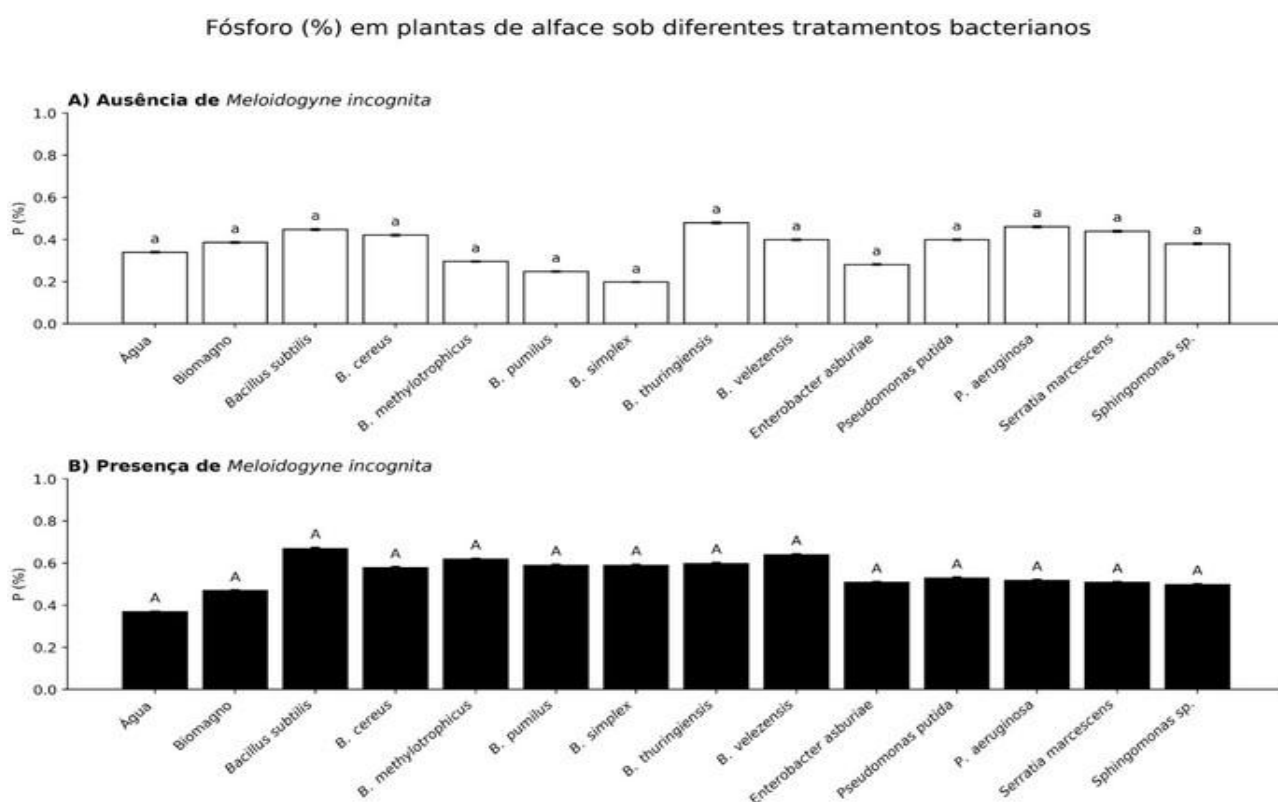


Fonte: Da autora (2026).

O fósforo desempenha papel fundamental no metabolismo energético vegetal, participando da transferência de energia, da síntese de ácidos nucleicos e do desenvolvimento radicular. Entretanto, grande parte do fósforo presente nos solos encontra-se em formas pouco disponíveis para absorção pelas plantas. Rizobactérias promotoras de crescimento vegetal são capazes de aumentar a disponibilidade desse nutriente por meio da produção de ácidos orgânicos e enzimas fosfatases que promovem a solubilização de fosfatos insolúveis (Rodríguez; Fraga, 1999). Além disso, a manutenção da integridade do sistema radicular favorece a absorção e a translocação do fósforo para a parte aérea das plantas.

Os resultados observados no presente estudo (Figura 8) indicam que os tratamentos bacterianos contribuíram para a manutenção dos teores foliares de fósforo quando comparados ao controle inoculado apenas com o nematoide. Esses resultados sugerem que a atividade dos microrganismos na rizosfera favoreceu a disponibilidade e a absorção desse nutriente, reduzindo os efeitos negativos causados por *M. incognita* sobre o sistema radicular.

Figura 8 – Teor foliar de fósforo em plantas de alface submetidas aos tratamentos com bactérias, na presença e na ausência de *M. incognita*. Médias seguidas de letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ) sendo as letras minúsculas para o experimento na ausência de nematoide e as letras maiúsculas para o experimento na presença do nematoide.

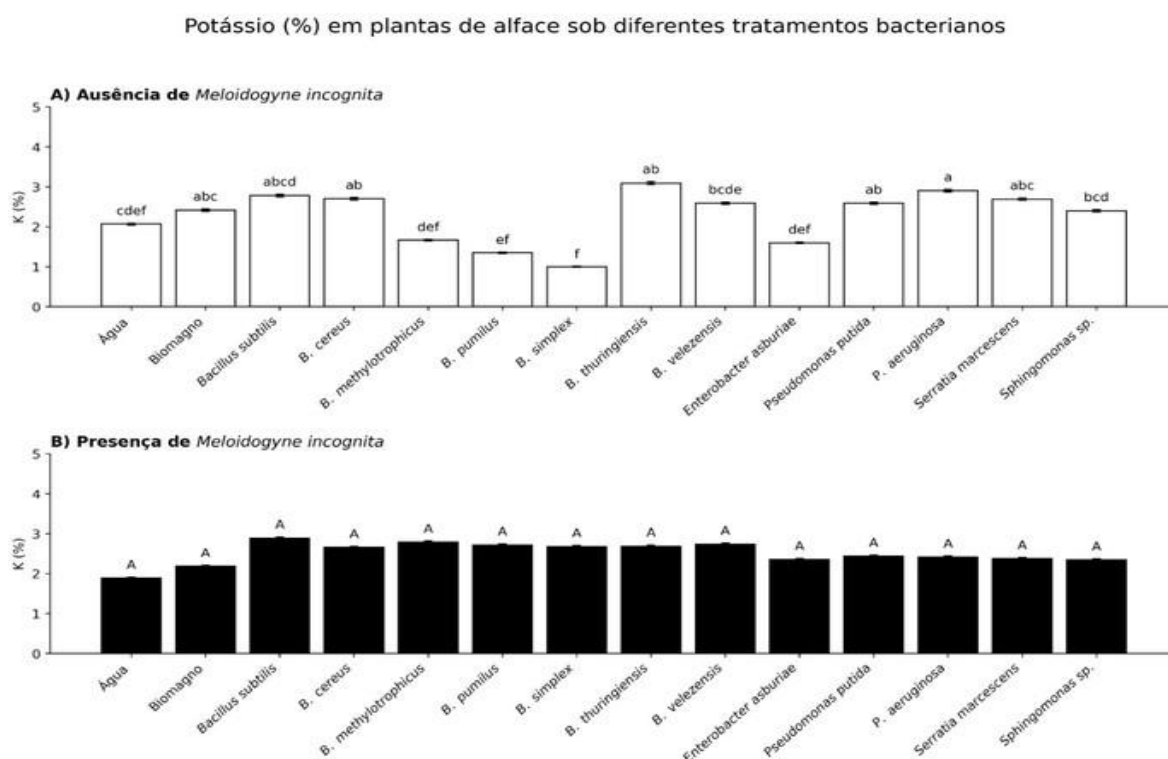


Fonte: Da autora (2026).

O potássio é um dos principais macronutrientes envolvidos na regulação osmótica, ativação enzimática, transporte de assimilados e tolerância a estresses bióticos e abióticos. Danos causados por nematoides-das-galhas podem comprometer a absorção desse nutriente em função da redução da eficiência funcional das raízes (Moens; Perry; Starr, 2009). Estudos demonstram que microrganismos benéficos presentes na rizosfera favorecem a absorção e o equilíbrio nutricional das plantas, contribuindo para a manutenção dos teores de potássio mesmo em condições de estresse (Backer *et al.*, 2018).

Os resultados obtidos no presente estudo (Figura 9) corroboram essas observações, indicando que os tratamentos bacterianos contribuíram para a manutenção dos teores foliares de potássio em comparação ao tratamento inoculado apenas com *M. incognita*. Esses resultados sugerem que a colonização bacteriana auxiliou na preservação da funcionalidade do sistema radicular e da absorção de nutrientes, reduzindo os impactos fisiológicos causados pelo nematoide.

Figura 9 – Teor foliar de potássio em plantas de alface submetidas aos tratamentos com bactérias, na presença e na ausência de *M. incognita*. Médias seguidas de letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ) sendo as letras minúsculas para o experimento na ausência de nematoide e as letras maiúsculas para o experimento na presença do nematoide.



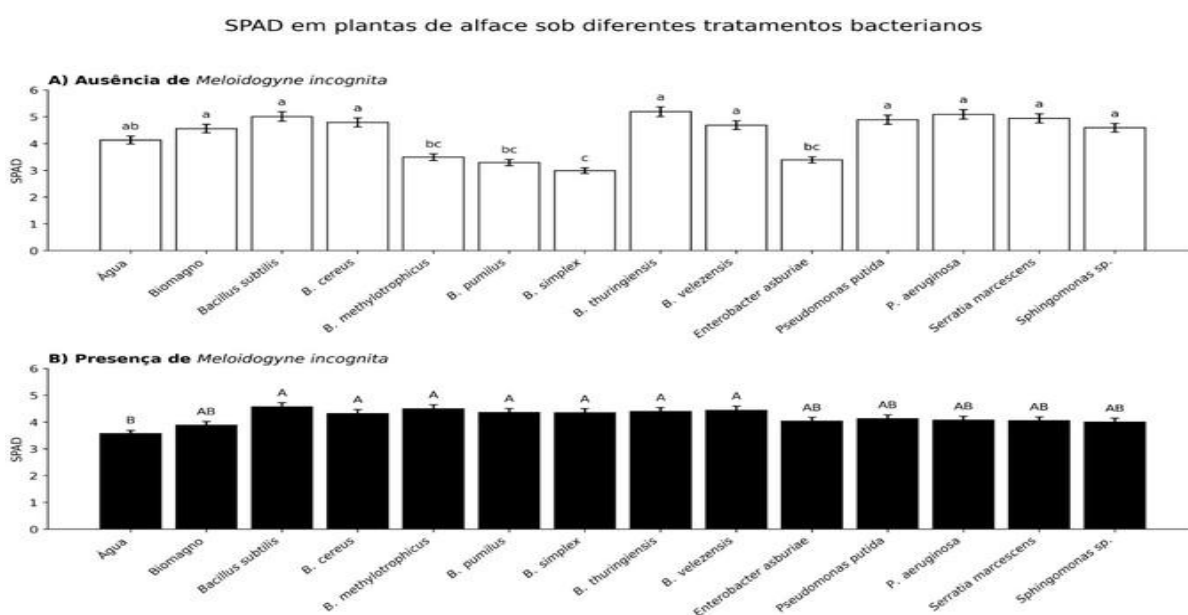
Fonte: Da autora (2026).

### 4.3 Análise dos Parâmetros fisiológicos (SPAD, Prolina, SOD)

A redução dos teores de clorofila é uma das respostas fisiológicas frequentemente observadas em plantas infectadas por nematoides-das-galhas. A formação de galhas compromete a absorção de água e nutrientes, especialmente nitrogênio e magnésio, elementos essenciais para a biossíntese de clorofila, resultando em sintomas como clorose, redução da atividade fotossintética e menor crescimento vegetal (Moens; Perry; Starr, 2009; Taiz *et al.*, 2017). Estudos conduzidos com diferentes culturas hospedeiras de *Meloidogyne* spp. relatam reduções significativas nos teores de clorofila e na eficiência fotossintética em decorrência dos danos provocados pelo nematoide ao sistema radicular (Taiz *et al.*, 2017).

Os resultados obtidos no presente estudo (Figura 10) corroboram essas observações, uma vez que as plantas inoculadas apenas com *M. incognita* apresentaram menores valores de índice SPAD, enquanto os tratamentos com os isolados bacterianos mantiveram níveis de clorofila superiores. Esse comportamento sugere que a colonização bacteriana contribuiu para a manutenção do estado nutricional e da atividade fotossintética das plantas, reduzindo os efeitos fisiológicos negativos causados pelo parasitismo do nematoide.

Figura 10 – Índice SPAD de plantas de alface submetidas aos tratamentos com bactérias, na presença e na ausência de *M. incognita*. Médias seguidas de letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ) sendo as letras minúsculas para o experimento na ausência de nematoide e as letras maiúsculas para o experimento na presença do nematoide.

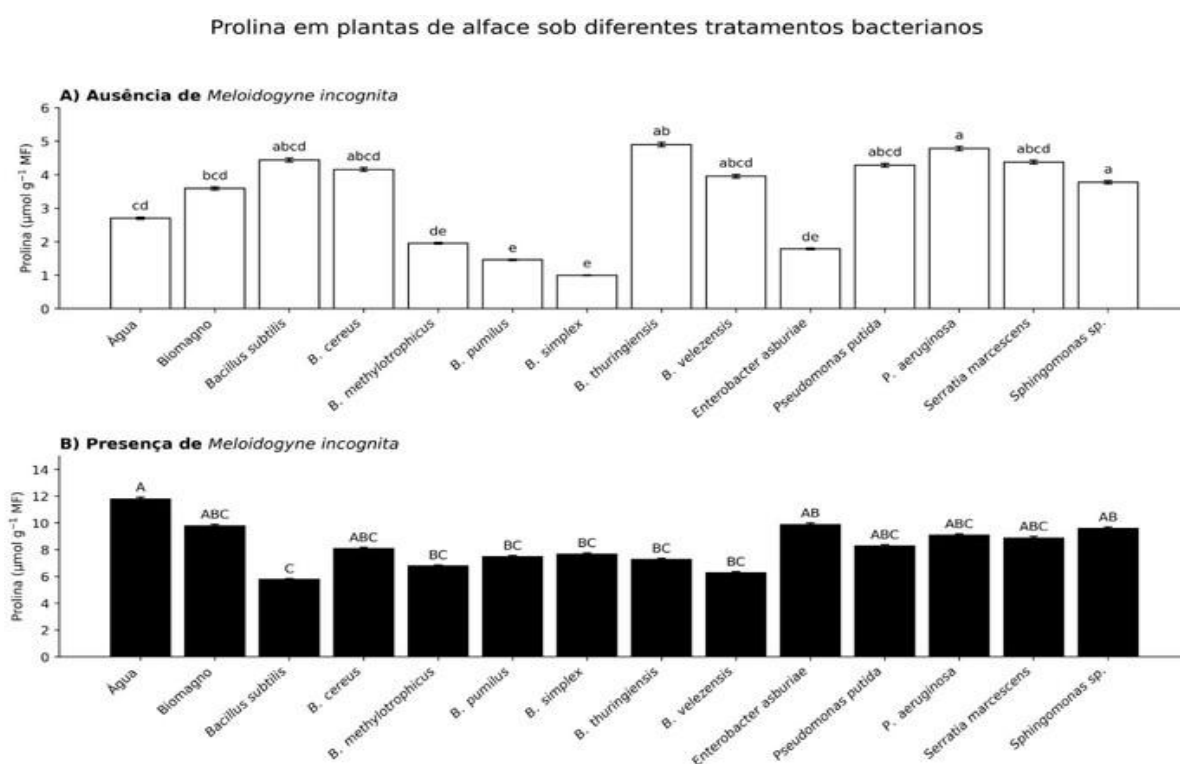


Fonte: Da autora (2026).

A prolina é um dos principais osmólitos acumulados pelas plantas em resposta a condições de estresse biótico e abiótico. Além de atuar na manutenção do equilíbrio osmótico celular, esse aminoácido contribui para a estabilização de proteínas e membranas, proteção contra danos oxidativos e recuperação metabólica após a remoção do estresse (Bates; Waldren; Teare, 1973; Ashraf; Foolad, 2007). Estudos demonstram que a interação com rizobactérias promotoras de crescimento vegetal pode modular o metabolismo da prolina e outros compostos relacionados à tolerância ao estresse, favorecendo respostas fisiológicas mais eficientes diante da infecção por patógenos (Pieterse *et al.*, 2014; Backer *et al.*, 2018).

Os resultados observados no presente estudo (Figura 11) indicam alterações nos teores foliares de prolina em função dos tratamentos avaliados, sugerindo que os isolados bacterianos influenciaram os mecanismos fisiológicos associados à resposta ao estresse causado por *M. incognita*. A manutenção de níveis adequados desse aminoácido pode ter contribuído para a maior tolerância das plantas ao parasitismo, favorecendo a preservação do metabolismo celular e do crescimento vegetal.

Figura 11 – Teores de prolina foliar em plantas de alface submetidas aos tratamentos com as bactérias, na presença e na ausência de *M. incognita*. Médias seguidas de letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ), sendo as letras minúsculas para o experimento na ausência de nematoide e as letras maiúsculas para o experimento na presença do nematoide.



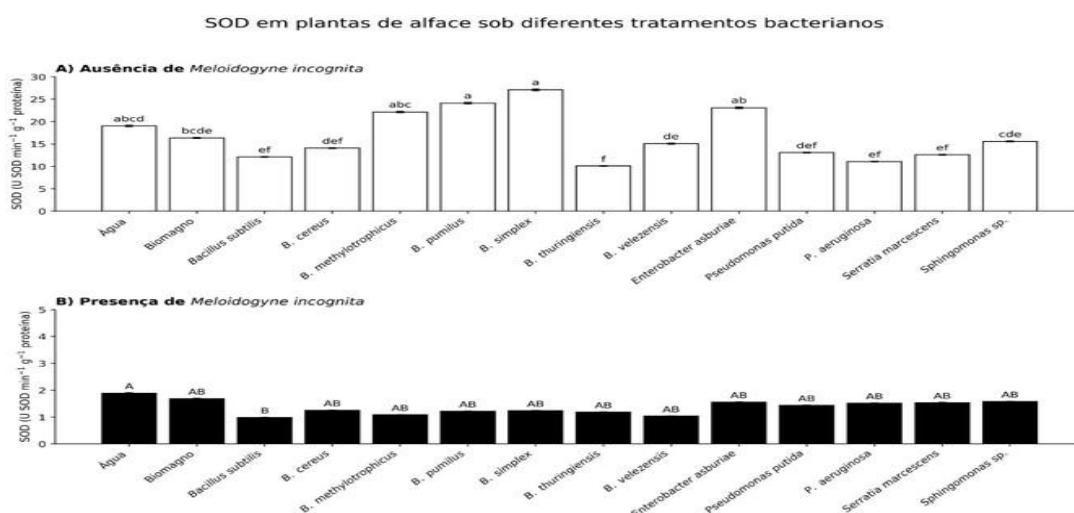
Fonte: Da autora (2026).

A produção excessiva de espécies reativas de oxigênio (EROs) constitui uma resposta comum das plantas durante a infecção por patógenos, incluindo nematoides-das-galhas. Embora essas moléculas participem da sinalização de defesa, seu acúmulo pode causar danos oxidativos às membranas, proteínas e ácidos nucleicos. Nesse contexto, enzimas antioxidantes como a superóxido dismutase (SOD) desempenham papel fundamental na proteção celular ao catalisar a conversão do radical superóxido em compostos menos tóxicos (Alscher; Erturk; Heath, 2002; Gill; Tuteja, 2010).

Diversos estudos demonstram que rizobactérias promotoras de crescimento vegetal podem induzir mecanismos de resistência sistêmica e estimular a atividade de enzimas antioxidantes, aumentando a capacidade das plantas de tolerar estresses bióticos (Kloepper; Ryu; Zhang, 2004; Pieterse *et al.*, 2014). Dessa forma, a elevação da atividade de SOD tem sido frequentemente associada à ativação de respostas defensivas mediadas por microrganismos benéficos.

Os resultados observados neste estudo (Figura 12) sugerem que os isolados bacterianos influenciaram a atividade da SOD em plantas submetidas à infecção por *M. incognita*, indicando a participação de mecanismos antioxidantes na resposta ao parasitismo. Esse comportamento reforça a hipótese de que a colonização bacteriana contribuiu para o fortalecimento das defesas fisiológicas das plantas, reduzindo os danos oxidativos associados à infecção.

Figura 12 – Atividade da enzima superóxido dismutase (SOD) em plantas de tomate alface submetidas aos tratamentos com bactérias, na presença e na ausência de *M. incognita*. Médias seguidas de letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ) sendo as letras minúsculas para o experimento na ausência de nematoide e as letras maiúsculas para o experimento na presença do nematoide.



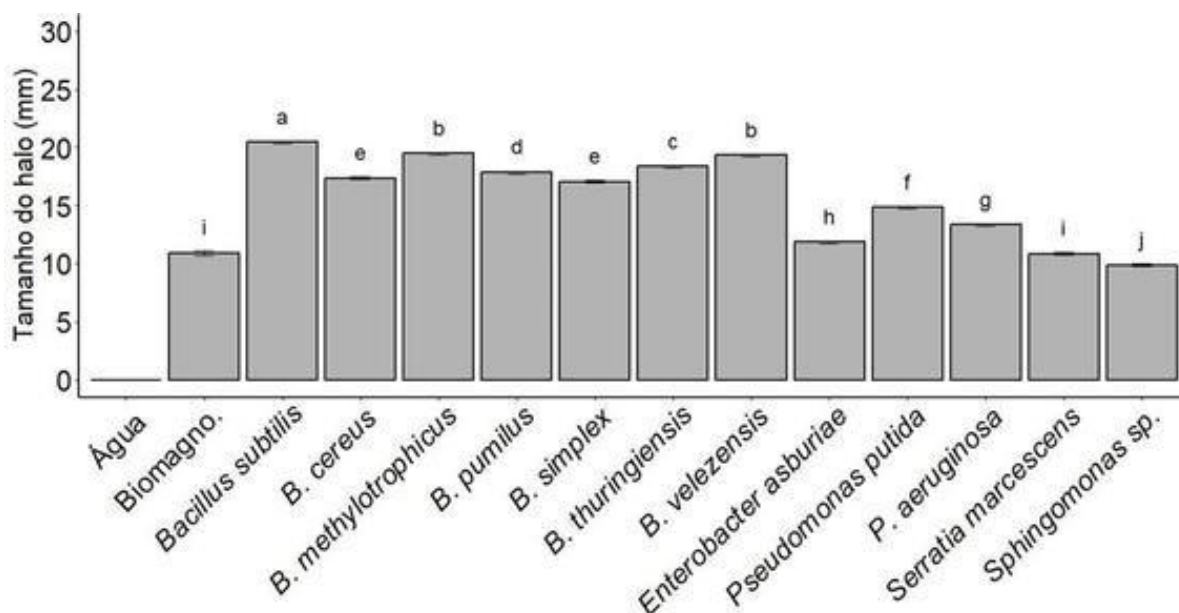
Fonte: Da autora (2026).

#### 4.4 Ensaios de atividade bacteriana

A capacidade de solubilizar fosfatos inorgânicos constitui um dos mecanismos mais importantes de promoção de crescimento vegetal por rizobactérias. Microrganismos solubilizadores de fosfato são capazes de converter formas insolúveis desse nutriente em formas assimiláveis pelas plantas por meio da produção de ácidos orgânicos, redução do pH da rizosfera e secreção de enzimas fosfatases (Rodríguez; Fraga, 1999). Esse processo aumenta a disponibilidade de fósforo para as raízes, favorecendo o desenvolvimento vegetal e melhorando a eficiência nutricional das culturas.

Os resultados obtidos no presente estudo (Figura 13) corroboram essas observações, uma vez que os isolados bacterianos apresentaram halos de solubilização em meio NBRIP, evidenciando sua capacidade de disponibilizar fósforo insolúvel. Essa característica pode ter contribuído para os maiores teores foliares de fósforo observados nas plantas tratadas, bem como para a manutenção do crescimento vegetal mesmo sob a presença de *M. incognita*.

Figura 13 – Diâmetro médio dos halos de solubilização de fosfato formado por isolados bacterianos em meio NBRIP. Médias seguidas de letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).



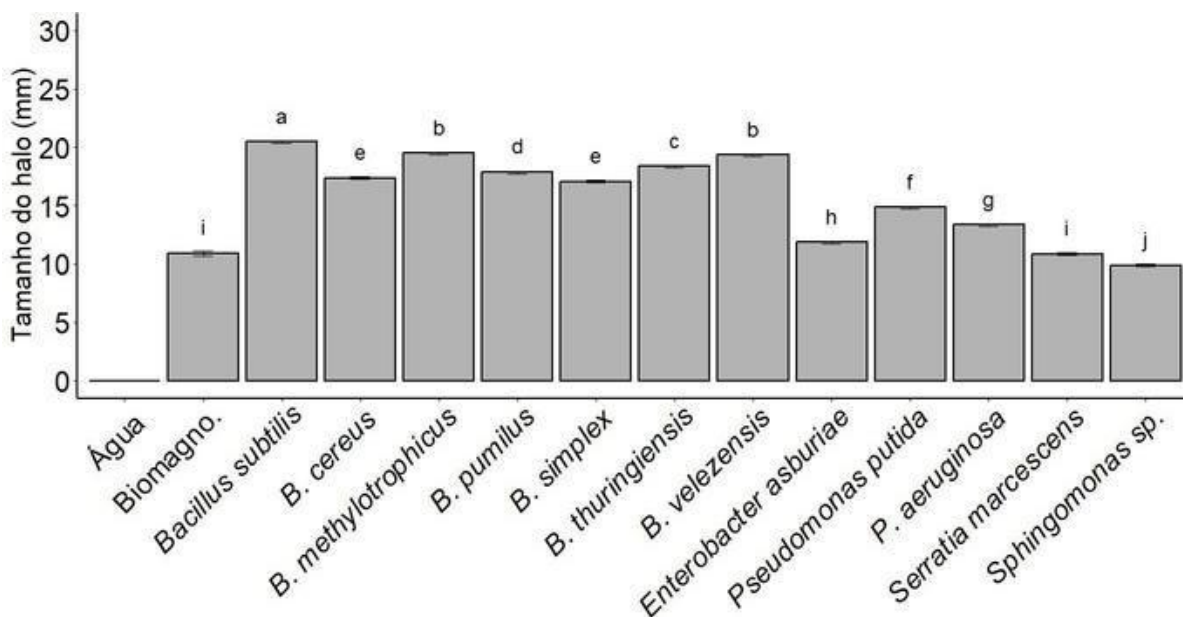
Fonte: Da autora (2026).

A produção de enzimas amilolíticas é considerada um importante indicador da versatilidade metabólica de bactérias associadas à rizosfera. A capacidade de degradar amido e

outros polissacarídeos complexos amplia as possibilidades de utilização de diferentes fontes de carbono presentes no ambiente radicular, favorecendo a sobrevivência, colonização e competitividade dos microrganismos no solo (Cappuccino; Sherman, 2014; Madigan *et al.*, 2021). Além disso, a produção de enzimas extracelulares está frequentemente associada à adaptação e ao estabelecimento eficiente de bactérias promotoras de crescimento vegetal na rizosfera (Backer *et al.*, 2018).

Os resultados obtidos no presente estudo (Figura 14) demonstram que a maioria dos isolados avaliados apresentou atividade amilolítica, evidenciada pela formação de halos de hidrólise em meio contendo amido. Essa capacidade sugere elevado potencial de adaptação dos isolados ao ambiente rizosférico e pode ter favorecido sua persistência junto ao sistema radicular das plantas de alface, contribuindo para o desempenho observado nos ensaios de promoção de crescimento e biocontrole.

Figura 14 – Tamanho dos halos formados pelos isolados bacterianos em meio com amido, indicando capacidade de hidrólise (degradação) enzimática. Médias seguidas de letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).



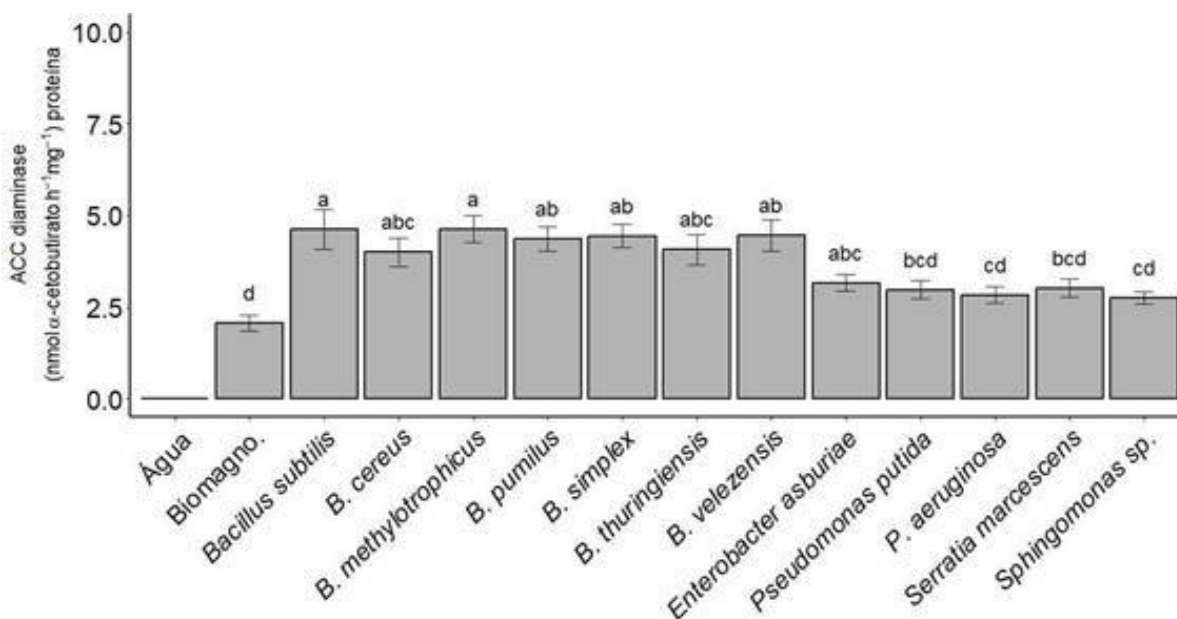
Fonte: Da autora (2026).

A enzima ACC deaminase desempenha papel fundamental na promoção de crescimento vegetal sob condições de estresse. Essa enzima catalisa a degradação do ácido 1-aminociclopropano-1-carboxílico (ACC), precursor imediato da síntese de etileno, reduzindo os níveis desse hormônio nas plantas. Como consequência, ocorre menor inibição do crescimento radicular e maior tolerância a estresses bióticos e abióticos (Glick, 2014; Penrose;

Glick, 2003). Diversos estudos demonstram que bactérias produtoras de ACC deaminase favorecem o desenvolvimento vegetal e reduzem os efeitos negativos causados por patógenos, contribuindo para a manutenção do crescimento mesmo em condições adversas (Glick, 2014; Pieterse *et al.*, 2014).

Os resultados obtidos neste estudo (Figura 15) corroboram essas observações, uma vez que os isolados avaliados apresentaram atividade de ACC deaminase. Esse mecanismo pode ter contribuído para a manutenção da biomassa vegetal e do comprimento radicular observados nos tratamentos bacterianos, reduzindo os efeitos fisiológicos associados ao parasitismo de *M. incognita* e favorecendo a continuidade do desenvolvimento das plantas de alface.

Figura 15 – Produção da enzima ACC desaminase pelos isolados bacterianos. Médias seguidas de letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).



Fonte: Da autora (2026).

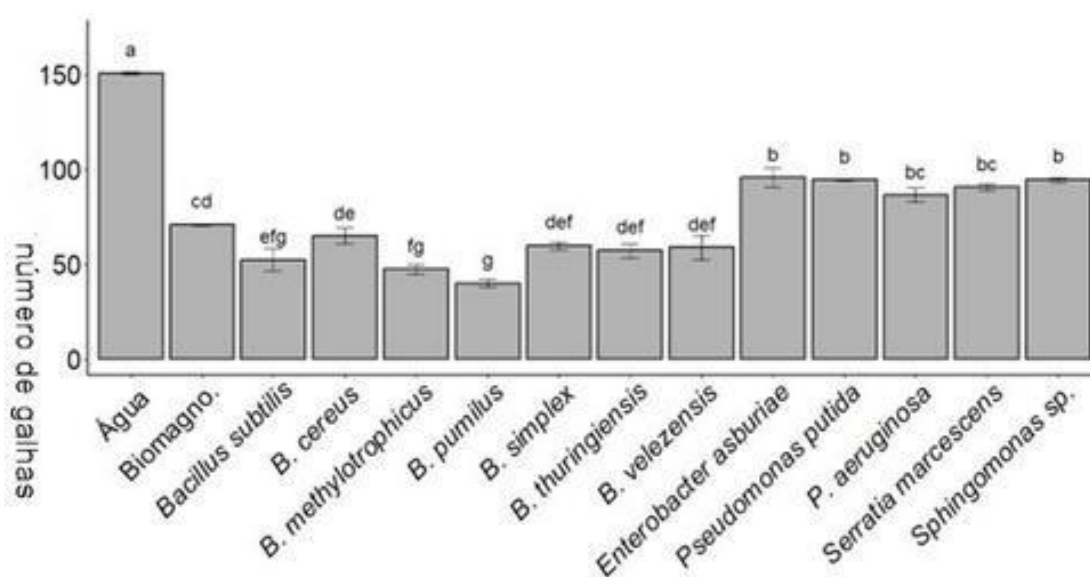
#### 4.5 Parâmetros nematológicos

Diversos estudos demonstram que rizobactérias promotoras de crescimento vegetal podem reduzir significativamente a formação de galhas causadas por nematoides-das-galhas por meio de mecanismos diretos e indiretos de biocontrole. Entre esses mecanismos destacam-se a produção de metabólitos com atividade nematicida, a competição por nichos ecológicos na rizosfera, a alteração dos exsudatos radiculares e a indução de resistência sistêmica nas plantas hospedeiras (Kloepper; Ryu; Zhang, 2004; Backer *et al.*, 2018). Além disso, a colonização radicular por bactérias benéficas pode interferir na formação e manutenção das células gigantes

e dos sítios de alimentação necessários ao desenvolvimento de *Meloidogyne* spp. (Pieterse *et al.*, 2014; Moens; Perry; Starr, 2009).

Os resultados obtidos no presente estudo (Figura 16) corroboram essas observações, uma vez que os tratamentos bacterianos promoveram reduções significativas no número de galhas em comparação ao controle inoculado apenas com *M. incognita*. Esses resultados indicam que os isolados avaliados atuaram na supressão do processo de infecção, reduzindo o estabelecimento do nematoide e limitando seu desenvolvimento no interior das raízes.

Figura 16 – Número de galhas de *M. incognita* em raízes de tomateiro alface submetidas aos tratamentos com bactérias, na presença e na ausência de *M. incognita*. Médias seguidas de letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).



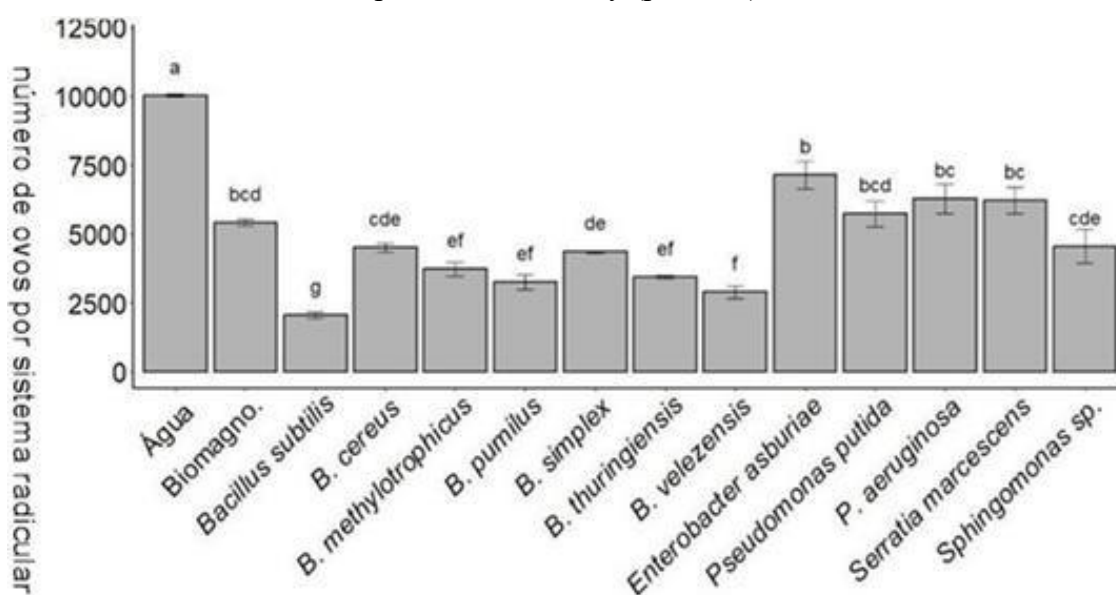
Fonte: Da autora (2026).

A redução da reprodução constitui um dos principais indicadores da eficiência de agentes de biocontrole contra fitonematoides. Diversos estudos demonstram que bactérias rizosféricas podem reduzir a oviposição e a viabilidade dos ovos por meio da produção de metabólitos tóxicos e enzimas hidrolíticas, como quitinases, proteases e lipases, capazes de degradar estruturas protetoras dos ovos e comprometer o desenvolvimento embrionário (Tian; Yang; Zhang, 2007). Além disso, a redução da formação de sítios de alimentação limita o desenvolvimento das fêmeas e, consequentemente, sua capacidade reprodutiva.

Os resultados observados neste estudo (Figura 17) corroboram essas evidências, uma vez que os tratamentos bacterianos promoveram reduções expressivas no número de ovos produzidos por *M. incognita*. Esse comportamento sugere que os isolados avaliados

interferiram diretamente na reprodução do nematoide, contribuindo para a diminuição da população final do patógeno.

Figura 17 – Número de ovos de *M. incognita* em raízes de alface submetidas aos tratamentos com bactérias, na presença de *M. incognita*. Médias seguidas de letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).



Fonte: Da autora (2026).

O fator de reprodução (FR) é amplamente utilizado para avaliar a capacidade de multiplicação de nematoides em uma determinada condição experimental, sendo considerado um dos parâmetros mais confiáveis para mensurar a eficiência de estratégias de controle. De acordo com Moens, Perry e Starr (2009), valores de FR inferiores a 1 indicam que a população final do nematoide foi menor que a população inicial, caracterizando redução populacional e efeito supressivo do tratamento. Dessa forma, esse parâmetro fornece uma estimativa integrada dos efeitos do tratamento sobre todas as etapas do ciclo biológico do patógeno.

Os resultados apresentados no Quadro 2 demonstram que diversos isolados bacterianos foram capazes de reduzir significativamente a multiplicação de *M. incognita*. Destacam-se especialmente *Sphingomonas sp.* (FR = 0,32), *Bacillus subtilis* (FR = 0,52) e *Pseudomonas putida* (FR = 0,69), que apresentaram os menores valores de fator de reprodução. Esses resultados indicam elevada eficiência desses microrganismos na supressão populacional do nematoide e reforçam seu potencial para utilização em programas de manejo integrado de nematoides-das-galhas.

Quadro 2 – Fator de reprodução (FR) de *M. incognita* em alface submetida a diferentes tratamentos bacterianos. Médias seguidas de letras distintas na coluna diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

| Tratamento                   | Fator de reprodução (FR) |
|------------------------------|--------------------------|
| Água                         | 2,00 a                   |
| <i>Biomagno</i>              | 1,04 bcd                 |
| <i>Bacillus subtilis</i>     | 0,52 f                   |
| <i>B. cereus</i>             | 1,05 bc                  |
| <i>B. methylotrophicus</i>   | 0,99 bcd                 |
| <i>B. pumilus</i>            | 0,90 cde                 |
| <i>B. simplex</i>            | 0,85 cde                 |
| <i>B. thuringiensis</i>      | 0,74 de                  |
| <i>B. velezensis</i>         | 0,79 de                  |
| <i>Enterobacter asburiae</i> | 0,96 b                   |
| <i>Pseudomonas putida</i>    | 0,69 ef                  |
| <i>P. aeruginosa</i>         | 0,75 de                  |
| <i>Serratia marcescens</i>   | 0,79 de                  |
| <i>Sphingomonas</i> sp.      | 0,32 g                   |

Fonte: Da autora (2026).

A orientação dos juvenis de segundo estágio (J2) em direção às raízes hospedeiras é fortemente influenciada pelos compostos químicos presentes na rizosfera. Estudos demonstram

que exsudatos radiculares e metabólitos produzidos por microrganismos associados às raízes podem atuar como atrativos ou repelentes para *Meloidogyne* spp., interferindo diretamente na localização do hospedeiro e no sucesso da infecção (Kihika *et al.*, 2017; Tsai *et al.*, 2021). Além disso, bactérias promotoras de crescimento vegetal podem modificar a composição química dos exsudatos radiculares, alterando os sinais utilizados pelos juvenis durante o processo de orientação quimiotática (Čepulytė *et al.*, 2018).

Os resultados obtidos no presente estudo (Quadro 3) corroboram essas observações, uma vez que vários isolados apresentaram índices de quimiotaxia negativos, indicando efeito repelente sobre os juvenis de *M. incognita*. Destacam-se *Bacillus thuringiensis* (IQ = -0,30), *Pseudomonas aeruginosa* (IQ = -0,26), *Bacillus subtilis* (IQ = -0,25), *Serratia marcescens* (IQ = -0,23) e *Pseudomonas putida* (IQ = -0,22), os quais apresentaram os maiores efeitos repelentes. Esses resultados sugerem que parte da supressão observada nos parâmetros nematológicos ocorreu antes mesmo da penetração dos juvenis nas raízes, reduzindo a probabilidade de encontro entre o nematoide e a planta hospedeira.

Quadro 3 – Índice de quimiotaxia (IQ) de *Meloidogyne*.

| Amostra                      | Média IQ | Erro IQ |
|------------------------------|----------|---------|
| Água                         | 0        | 0       |
| <i>Biomagno</i>              | -0.09    | 0.05    |
| <i>Bacillus subtilis</i>     | -0.25    | 0.07    |
| <i>B. cereus</i>             | -0.2     | 0.06    |
| <i>B. methylotrophicus</i>   | -0.04    | 0.04    |
| <i>B. pumilus</i>            | -0.02    | 0.04    |
| <i>B. simplex</i>            | 0.05     | 0.04    |
| <i>B. thuringiensis</i>      | -0.3     | 0.08    |
| <i>B. velezensis</i>         | -0.17    | 0.06    |
| <i>Enterobacter asburiae</i> | -0.03    | 0.04    |
| <i>Pseudomonas putida</i>    | -0.22    | 0.07    |
| <i>P. aeruginosa</i>         | -0.26    | 0.07    |
| <i>Serratia marcescens</i>   | -0.23    | 0.07    |
| <i>Sphigomonas</i> sp.       | -0.17    | 0.01    |

Fonte: Da autora (2026).

## 5. CONCLUSÃO

A presente pesquisa evidencia que a inoculação com bactérias constitui uma estratégia eficaz e multifuncional para a cultura da alface, atuando na promoção do crescimento e na mitigação dos danos de *incognita*. Contudo, a análise detalhada dos dados revela que a eficácia não é uniforme, variando significativamente de acordo com o mecanismo de ação de cada isolado.

Os resultados obtidos demonstram que o uso de bactérias, em especial os isolados de *thuringiensis* e *pumilus*, promoveu uma redução significativa no fator de reprodução de *M. incognita* e no número de galhas, aliada a um aumento expressivo na biomassa seca da parte aérea e das raízes da alface. A eficácia desses isolados foi corroborada pelos ensaios de quimiotaxia, onde o *B. thuringiensis* apresentou o maior índice de repelência (IQ = -0,3), estabelecendo uma barreira química inicial que dificulta a localização das raízes pelo nematoide. Além disso, a melhoria no estado nutricional das plantas, evidenciada pelos maiores teores de nitrogênio e fósforo, reforça o papel desses microrganismos não apenas como agentes de biocontrole, mas como promotores ativos do crescimento vegetal.

Em termos de desenvolvimento vegetativo, a introdução dos isolados, especialmente os do gênero *Bacillus*, foi capaz de reverter os efeitos deletérios do parasitismo, promovendo um incremento na absorção de nitrogênio (N) e fósforo (P). Isso confere às plantas maior vigor e capacidade de sustentar o crescimento mesmo sob pressão biótica.

Portanto, conclui-se que esta diferenciação suporta a hipótese de que o manejo ideal pode envolver a combinação desses agentes biológicos para garantir uma proteção completa e sustentável da cultura da alface, o uso de inoculantes baseados nessas bactérias transcende a simples substituição de insumos, posicionando-se como uma alternativa tecnológica robusta e sustentável frente aos nematicidas químicos. Os resultados indicam que a viabilidade técnica demonstrada nestes ensaios suporta a integração destes agentes biológicos em programas de Manejo Integrado de Pragas (MIP), alinhando a produtividade da cultura da alface às demandas contemporâneas por práticas agrícolas ambientalmente seguras. No entanto, são necessários estudos futuros para avaliar a aplicação das combinações entre os isolados que apresentaram os melhores resultados, visando identificar possíveis efeitos sinérgicos que possam potencializar ainda mais o controle de *M. incognita* e a promoção do crescimento da cultura em condições de campo.

## REFERÊNCIAS

- ABCSEM. Associação Brasileira do Comércio de Sementes e Mudas. **Panorama do mercado de hortaliças no Brasil**. Campinas: ABCSEM, 2024. Disponível em: <https://www.abcsem.com.br>. Acesso em: 02 jun. 2026.
- ABD-ELGAWAD, M. M. M.; ASKARY, T. H. Fungal and bacterial nematicides in integrated nematode management strategies. **Egyptian Journal of Biological Pest Control**, v. 30, n. 74, p. 1-25, 2020.
- ADAM, M.; HEUER, H.; HALLMANN, J. Bacterial antagonists of fungal pathogens also control root-knot nematodes by induced systemic resistance of tomato plants. **PLoS ONE**, v. 9, n. 2, e90402, 2014.
- ALSCHER, R. G.; ERTURK, N.; HEATH, L. S. Role of superoxide dismutases (SODs) in controlling oxidative stress in plants. **Journal of Experimental Botany**, v. 53, n. 372, p. 1331–1341, 2002.
- ARGENTA, G. *et al.* Relationship between chlorophyll content and leaf nitrogen concentration in maize. **Ciência Rural**, v. 31, p. 715-722, 2001.
- ASHRAF, M.; FOOLAD, M. R. Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance. **Environmental and Experimental Botany**, v. 59, p. 206-216, 2007.
- AYAZ, M. *et al.* Role of *Bacillus* spp. in management of plant-parasitic nematodes: a review. **Biological Control**, v. 181, 105212, 2024.
- BACKER, R. *et al.* Plant growth-promoting rhizobacteria: context, mechanisms of action, and roadmaps to commercialization of biostimulants for sustainable agriculture. **Frontiers in Plant Science**, v. 9, 1473, 2018.
- BAKER, K. F.; COOK, R. J. **Biological Control of Plant Pathogens**. San Francisco: W. H. Freeman, 1974.
- BATES, L. S.; WALDREN, R. P.; TEARE, I. D. Rapid determination of free proline for water-stress studies. **Plant and Soil**, v. 39, p. 205-207, 1973.
- BEAUREGARD, P. B. *et al.* *Bacillus subtilis* biofilm induction by plant polysaccharides. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 110, p. E1621-E1630, 2013.
- BITAS, V. *et al.* Sniffing on microbes: diverse roles of microbial volatile organic compounds in plant health. **Molecular Plant-Microbe Interactions**, v. 26, p. 835-843, 2013.
- BONETTI, J. I. S.; FERRAZ, S. Modificação do método de Hussey e Barker para extração de ovos de *Meloidogyne exigua* em raízes de cafeeiro. **Fitopatologia Brasileira**, v. 6, p. 553, 1981.
- CARVALHO, J. E. *et al.* Aspectos nutricionais e importância econômica da alface. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 23, n. 4, p. 1021-1024, 2005.

CASTRO, J. M. C.; MOREIRA, A. **Nematoides das galhas (*Meloidogyne* spp.) em hortaliças: sintomas, diagnose e manejo**. Brasília: Embrapa Hortaliças, 2012.

CAPPUCCINO, J. G.; SHERMAN, N. **Microbiology: A Laboratory Manual**. 10. ed. Boston: Pearson, 2014.

CAULIER, S. *et al.* Bacillus-based biological control of plant diseases. **Frontiers in Microbiology**, v. 10, 2019.

CAVALCANTI, V. P. **Potencial de *Bacillus subtilis* no controle de *Meloidogyne incognita* e monitoramento por sensoriamento remoto em alface**. 2022. Tese (Doutorado em Agronomia/Fitotecnia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2022.

ČEPULYTĖ, R. *et al.* Root exudate-mediated control of plant parasitic nematodes. **Frontiers in Plant Science**, v. 9, 2018.

CHARCHAR, J. M. **Nematoides em hortaliças**. Brasília: Embrapa Hortaliças, 1999.

CHARCHAR, J. M.; MOITA, A. W. Reação de cultivares de alface a *Meloidogyne incognita*. **Horticultura Brasileira**, v. 23, p. 186-189, 2005.

CHERNIN, L. *et al.* Chitinolytic *Enterobacter* agglomerans antagonistic to fungal plant pathogens. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 61, p. 1720-1726, 1995.

CHET, I.; INBAR, J. Biological control of fungal pathogens. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v. 48, p. 37-43, 1994.

CHIALVA, M. *et al.* Native soils with their microbiotas elicit a state of alert in tomato plants. **New Phytologist**, v. 229, n. 6, p. 3285–3300, 2021.

EL-NAGDI, W. M. A.; YOUSSEF, M. M. A.; DAWOOD, M. G. Biological control of root-knot nematodes using *Bacillus* species. **Egyptian Journal of Agronematology**, v. 21, p. 1-18, 2022.

FERRAZ, S. **Nematologia de Plantas: fundamentos e importância**. Viçosa: UFV, 2001.

FERRAZ, S. *et al.* **Manejo sustentável de fitonematoides**. Viçosa: UFV, 2010.

FINCHEIRA, P.; QUIROZ, A. Microbial volatiles as plant growth inducers. **Microbiological Research**, v. 208, p. 63-75, 2018.

FORGHANI, F.; HAJIHASSANI, A. Recent advances in the development of environmentally benign treatments to control root-knot nematodes. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, 2020.

GAO, H. *et al.* Volatile organic compounds from *Bacillus velezensis* suppress *Meloidogyne incognita* and induce plant resistance. **Biological Control**, v. 126, p. 8-16, 2018.

GILL, S. S.; TUTEJA, N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 48, p. 909-930, 2010.

GLICK, B. R. Bacteria with ACC deaminase can promote plant growth and help to feed the world. **Microbiological Research**, v. 169, p. 30-39, 2014.

GU, Y. Q.; MO. *et al.* Volatile compounds from *Bacillus* spp. against *Meloidogyne incognita*. **Biological Control**, v. 108, p. 34-41, 2017.

HANKIN, L.; ANAGNOSTAKIS, S. L. The use of solid media for detection of enzyme production by fungi. **Mycologia**, v. 67, p. 597-607, 1975.

HARMAN, G. E. *et al.* Trichoderma species—opportunistic avirulent plant symbionts. **Nature Reviews Microbiology**, v. 2, p. 43-56, 2004.

HASANUZZAMAN, M. *et al.* Reactive oxygen species and antioxidant defense in plants under abiotic stress. **Antioxidants**, v. 9, 681, 2020.

HSU, S. C.; LOCKWOOD, J. L. Powdered chitin agar as a selective medium for enumeration of actinomycetes in water and soil. **Applied Microbiology**, v. 29, p. 422-426, 1975.

HUBÁLEK, Z. Protectants used in the cryopreservation of microorganisms. **Cryobiology**, v. 46, p. 205-229, 2003.

HUSSEY, R. S.; JANSSEN, G. J. W. Root-knot nematodes: *Meloidogyne* species. In: STARR, J. L.; COOK, R.; BRIDGE, J. (ed.). **Plant resistance to parasitic nematodes**. Wallingford: CAB International, 2002. p. 43-70.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção Agrícola Municipal – PAM** 2024. Rio de Janeiro: IBGE, 2024. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9117-producao-agricola-municipal-culturas-temporarias-e-permanentes.html>. Acesso em: 2 jun. 2026.

JONES, J. T. *et al.* Top 10 plant-parasitic nematodes in molecular plant pathology. **Molecular Plant Pathology**, v. 14, p. 946-961, 2013.

KIHIKA, R. *et al.* Quantification of volatile compounds in root exudates and their effects on root-knot nematodes. **Crop Protection**, v. 97, p. 14-20, 2017.

KLOEPPER, J. W.; RYU, C. M.; ZHANG, S. Induced systemic resistance and promotion of plant growth by *Bacillus* spp. **Phytopathology**, v. 94, p. 1259-1266, 2004.

LI, B. *et al.* The importance of biofilm formation in plant growth-promoting rhizobacteria for biocontrol and plant growth promotion. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 99, n. 9, p. 3655–3664, 2015.

MADIGAN, M. T. *et al.* **Brock Biology of Microorganisms**. 16. ed. New York: Pearson, 2021.

MAHLEIN, A. K. Plant disease detection by imaging sensors. **Annual Review of Phytopathology**, v. 54, p. 373-393, 2016.

- MALDONADE, I. R.; MATTOS, L. M.; MORETTI, C. L. Manual de hortaliças não convencionais. Brasília: **Embrapa Hortaliças**, 2014.
- MAZZUCHELLI, R. C. L.; SOSA-GÓMEZ, D. R.; PIZZATTO, M. Biofilm formation by *Bacillus* spp. and its role in plant protection. **Biological Control**, v. 146, 104266, 2020.
- MINOLTA. SPAD-502 **Chlorophyll Meter Manual**. Osaka: Minolta Co., 1989.
- MOENS, M.; PERRY, R. N.; STARR, J. L. **Root-Knot Nematodes**. Wallingford: CAB International, 2009.
- MURUNGI, L. K. *et al.* Attraction of *Meloidogyne incognita* to root exudates. **Journal of Nematology**, v. 50, p. 357-368, 2018.
- NAUTIYAL, C. S. An efficient microbiological growth medium for screening phosphate solubilizing microorganisms. **FEMS Microbiology Letters**, v. 170, p. 265-270, 1999.
- ONGENA, M.; JACQUES, P. *Bacillus* lipopeptides: versatile weapons for plant disease biocontrol. **Trends in Microbiology**, v. 16, p. 115-125, 2008.
- PENROSE, D. M.; GLICK, B. R. Methods for isolating and characterizing ACC deaminase-containing plant growth-promoting rhizobacteria. **Physiologia Plantarum**, v. 118, p. 10-15, 2003.
- PIETERSE, C. M. J. *et al.* Induced systemic resistance by beneficial microbes. Annual. **Review of Phytopathology**, v. 52, p. 347-375, 2014.
- RABBEE, M. F. *et al.* *Bacillus velezensis*: a valuable member of bioactive molecules within plant microbiomes. **Molecules**, v. 24, 1046, 2019.
- RANDIG, O. *et al.* Genetic diversity of root-knot nematodes from Brazil and development of SCAR markers specific for the coffee-damaging species *Meloidogyne exigua*. **Phytopathology, St. Paul**, v. 92, n. 6, p. 628-635, 2002.
- RODRÍGUEZ, H.; FRAGA, R. Phosphate solubilizing bacteria and their role in plant growth promotion. **Biotechnology Advances**, v. 17, p. 319-339, 1999.
- RYU, C. M. *et al.* Bacterial volatiles promote growth in *Arabidopsis*. Proceedings of the National. **Academy of Sciences**, v. 100, p. 4927-4932, 2003.
- TAIZ, L. *et al.* **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.
- SOUZA, J. L. *et al.* **Produção de alface em sistemas convencional, orgânico e hidropônico**. Viçosa: UFV, 2019.
- TAYLOR, A. L.; SASSER, J. N. **Biology, Identification and Control of Root-Knot Nematodes** (*Meloidogyne* species). Raleigh: North Carolina State University Graphics, 1978.
- TIAN, B.; YANG, J.; ZHANG, K. Q. Bacteria used in the biological control of plant-parasitic nematodes. **FEMS Microbiology Ecology**, v. 61, p. 197-213, 2007.

TSAI, A. Y. L. *et al.* Root-knot nematode chemotaxis is positively regulated by lateral root exudates. **Science Advances**, v. 7, eabf7155, 2021.

VESSEY, J. K. Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. **Plant and Soil**, v. 255, p. 571-586, 2003.

XIANG, N.; LAWRENCE, K. S.; DONALD, P. A. Biological control of root-knot nematodes by *Bacillus* spp. **Biological Control**, v. 120, p. 39-47, 2018.

ZHANG, C.; KOVACS, J. M. The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review. **Precision Agriculture**, v. 13, n. 6, p. 693–712, 2012.

ZIJLSTRA, C.; DONKERS-VENNE, D. T. H. M.; FARGETTE, M. Identification of *Meloidogyne incognita* using SCAR-PCR. **Nematology**, v. 2, p. 847-853, 2000.