# EFEITO DE MICRORGANISMOS PROMOTORES DE CRESCIMENTO NO SISTEMA RADICULAR DA SOJA: Análise do desenvolvimento radicular em fase inicial

# EFFECT OF GROWTH-PROMOTING MICROORGANISMS ON THE ROOT SYSTEM OF SOYBEAN: Analysis of root development at the initial growth stage

OLIVEIRA, Ana Julia Alves[1]

SILVA, João Gabriel Cabral[2]

CAETANO, Edmilson Junior Medeiros[3]

## RESUMO

A soja configura-se como cultura fundamental para o suprimento global de grãos, óleos e proteínas. O uso de microrganismos promotores de crescimento vegetal consolida-se como alternativa sustentável para aumentar a produtividade e reduzir a dependência de fertilizantes químicos. Este estudo objetivou analisar os efeitos de inoculações individuais e combinadas de microrganismos promotores de crescimento sobre o desenvolvimento radicular inicial da soja. O experimento foi conduzido em casa de vegetação na Embrapa Arroz e Feijão, em Santo Antônio de Goiás (GO), em delineamento inteiramente casualizado, com cinco tratamentos: controle (sem inoculação), inoculação com *Serratia marcescens*, *Bacillus* sp., *Azospirillum brasilense* e *Trichoderma koningiopsis*, além da coinoculação entre os microrganismos, totalizando dez repetições por tratamento. As sementes foram microbiolizadas e cultivadas durante 14 dias em substrato composto por solo e areia, sem adição de fertilizantes, sob irrigação diária para manutenção da umidade. Os resultados indicaram efeitos significativos ($p \leq 0,01$) sobre o desenvolvimento radicular. O tratamento com *Azospirillum brasilense* incrementou em 29% o comprimento total das raízes, elevando de 38,73 cm no controle para 50,07 cm. Por sua vez, *Trichoderma koningiopsis* e a coinoculação proporcionaram aumentos no diâmetro (até 1,67 mm) e no volume radicular (até 1,24 cm 3), efeitos associados à produção de fitohormônios e à solubilização de nutrientes. Em contrapartida, *Serratia marcescens* reduziu a área superficial radicular em aproximadamente 31%.

**Palavras-chave**: Glycine max; microbiologia agrícola; bioestimulação; desenvolvimento radicular; inoculação.

## ABSTRACT

Soybeans are a fundamental crop for the global supply of grains, oils, and proteins. The use of plant growth-promoting microorganisms is consolidated as a sustainable alternative to increase productivity and reduce dependence on chemical fertilizers.

---

1 Acadêmico(a) Ana Julia Alves Oliveira do 10º Período do curso de Agronomia pelo Centro Universitário Mais - UNIMAIS. E-mail: analve@aluno.facmais.edu.br

2 Acadêmico João Gabriel Cabral Silva do 10º Período do curso de Agronomia pelo Centro Universitário Mais - UNIMAIS. E-mail: joaogabrielsilva@aluno.facmais.edu.br

3 Professor(a)-Orientador(a) Edmilson Junior Medeiros Caetano. Mestre em Área de Produção Vegetal. Docente do Centro Universitário Mais - UNIMAIS. E-mail: edmilson.caetano@facmais.edu.br

This study aimed to analyze the effects of individual and combined inoculations of growth-promoting microorganisms on the initial root development of soybeans. The experiment was carried out in a greenhouse at Embrapa Rice and Beans, in Santo Antônio de Goiás, Goiás, Brazil, in a completely randomized design, with five treatments: control (without inoculation), inoculation with Serratia marcescens, Bacillus sp., Azospirillum brasilense, and Trichoderma koningiopsis, in addition to co-inoculation between the microorganisms, totaling ten replicates per treatment. The seeds were microbiolized and cultivated for 14 days in a substrate composed of soil and sand, without the addition of fertilizers, under daily irrigation to maintain moisture. The results indicated significant effects ($p \leq 0.01$) on root development. The treatment with Azospirillum brasilense increased the total length of the roots by 29%, increasing from 38.73 cm in the control to 50.07 cm. In turn, Trichoderma koningiopsis and co-inoculation provided increases in diameter (up to 1.67 mm) and root volume (up to 1.24 $cm^3$), effects associated with the production of phytohormones and nutrient solubilization. On the other hand, Serratia marcescens reduced the root surface area by approximately 31%.

**Keywords**: Soybean; microorganisms; plant growth; root development; inoculation.

## 1 INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max*) é uma das culturas agrícolas de maior relevância em escala global, sendo amplamente empregada na produção de grãos, óleo e proteínas. O crescimento contínuo da demanda por soja, associado à pressão por práticas agrícolas mais sustentáveis, tem fomentado a busca por alternativas que otimizem a produtividade com reduzidos impactos ambientais. Nesse contexto, o uso de microrganismos promotores de crescimento de plantas (MPCPs) emerge como uma estratégia promissora, por oferecer benefícios como o aprimoramento do desenvolvimento radicular, a fixação de nitrogênio e a maior eficiência na absorção de nutrientes (Hungria *et al*., 2007).

Dentre os MPCPs, destacam-se bactérias do gênero *Rhizobium*, *Azospirillum* e *Bacillus*, bem como fungos do gênero *Trichoderma*, os quais exercem funções fundamentais para o desenvolvimento saudável da soja. As bactérias do gênero *Rhizobium*, por exemplo, formam nódulos radiculares onde ocorre a fixação biológica de nitrogênio, reduzindo a dependência de fertilizantes nitrogenados (Hungria *et al*., 2007). Por sua vez, bactérias do gênero *Azospirillum* estimulam o crescimento do sistema radicular, ampliando a exploração do solo e elevando a eficiência no uso de água e nutrientes (Lennon *et al*, 2023). No caso de microrganismos do gênero *Bacillus*, estes promovem a solubilização de fosfatos, tornando o fósforo mais disponível e incrementando a tolerância a condições adversas, como a seca (Plantio Direto *et al*, 2025). Além disso, fungos como *Trichoderma spp*. atuam no controle biológico de patógenos do solo e induzem a resistência sistêmica da planta mediante a produção de metabólitos bioativos (Harman *et al*., 2004; Mastouri; Bjökman; Harman *et al*, 2010).

Estudos recentes indicam que a coinoculação de diferentes MPCPs pode gerar efeitos sinérgicos, potencializando o desenvolvimento radicular e a produtividade da soja (Carvalho *et al*, 2023). Essa prática representa uma estratégia sustentável para reduzir a aplicação de fertilizantes químicos e aumentar a eficiência do manejo agrícola, contribuindo para um sistema produtivo mais equilibrado. No entanto, a tecnologia de MPCPs ainda carece de compreensão integral de suas interações com o sistema radicular da soja sob distintas condições edafoclimáticas.

Permanecem como questões em aberto os fatores relacionados à eficiência de colonização radicular, à compatibilidade entre os diferentes gêneros microbianos que compõem os consórcios de MPCPs e à resposta fisiológica da planta frente a doses específicas desses inoculantes. Ademais, a variabilidade de desempenho dos MPCPs em solos tropicais, como os do Cerrado brasileiro, evidencia a necessidade de investigações que contemplem sua aplicação prática e efeitos em escala regional.

Compreender em que medida essas interações influenciam o crescimento radicular é uma etapa essencial para explorar plenamente o potencial desses microrganismos. O sistema radicular, responsável pela sustentação mecânica e hídrica da planta, atua na absorção de água e nutrientes do substrato e na interação com microrganismos simbióticos. Portanto, é imperativo que o estudo avalie as respostas do sistema radicular à aplicação combinada e isolada de diferentes MPCPs, fornecendo subsídios para um emprego mais eficiente e sustentável desses bioprodutos.

Não obstante os benefícios documentados, persistem lacunas no entendimento dos efeitos específicos de doses individuais e de combinações de MPCPs sobre o desenvolvimento do sistema radicular da soja. Uma vez que as raízes constituem elemento vital para a absorção de água e nutrientes, a elucidação dessas interações mostra-se fundamental para a otimização do manejo agrícola. Nesse cenário, emerge a seguinte questão de pesquisa: de que modo doses individuais e combinações de microrganismos promotores de crescimento influenciam o desenvolvimento radicular da soja. Diante disso, o presente estudo tem como objetivo geral analisar os efeitos de doses individuais e de combinações de microrganismos promotores de crescimento no desenvolvimento do sistema radicular da soja, visando contribuir para a adoção de práticas agrícolas mais sustentáveis e eficientes.

## 2 MICRORGANISMOS MULTIFUNCIONAIS: UMA CHAVE PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DO SISTEMA RADICULAR DA SOJA

### 2.1 Microrganismos promotores de crescimento de plantas (MPCP): Conceitos e mecanismos de ação

A intensificação dos sistemas agrícolas nas últimas décadas, especialmente em culturas de grande relevância econômica como a soja, tem provocado crescente preocupação com os impactos ambientais e os custos elevados associados à aplicação indiscriminada de fertilizantes e defensivos químicos. Nesse contexto, os microrganismos promotores de crescimento de plantas (MPCP) surgem como uma alternativa sustentável, sendo caracterizados como microrganismos benéficos que estimulam direta ou indiretamente o desenvolvimento vegetal por meio de diversos mecanismos fisiológicos, bioquímicos e ecológicos (Vessey *et al*, 2003; Glick *et al*, 2012).

Os MPCP abrangem uma ampla gama de bactérias e fungos. Entre as bactérias, destacam-se os gêneros *Azospirillum*, *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Rhizobium* e *Serratia*, comumente encontrados na rizosfera e em associações endofíticas (Glick *et al*, 2012; Bashan; de-Bashan *et al*, 2010). No grupo fúngico, o gênero *Trichoderma* é reconhecido por sua capacidade de estimular o crescimento vegetal e atuar no controle biológico de patógenos (Harman *et al*., 2004). Esses microrganismos são utilizados tanto isoladamente quanto em consórcios, como nas coinoculações, prática que se demonstra estratégia promissora para sistemas agrícolas tropicais, como os do Cerrado brasileiro (Naoe *et al*., 2020).

Dentre os mecanismos diretos de promoção de crescimento, ressalta-se a fixação biológica de nitrogênio (FBN), efetuada por bactérias simbióticas como *Bradyrhizobium japonicum* em associação com a soja. Nesse processo, o nitrogênio atmosférico ($N_2$) é convertido em formas assimiláveis, como amônia ($NH_3$), suprindo a parte significativa da demanda nutricional da cultura (Hungria *et al.*, 2006). Adicionalmente à FBN, diversos MPCP possuem capacidade de solubilizar nutrientes como fósforo e potássio, convertendo compostos insolúveis em formas biodisponíveis por meio da liberação de ácidos orgânicos e fosfatases (Sharma *et al.*, 2013).

Outro mecanismo importante é a produção de fitohormônios, como auxinas (especialmente ácido indolacético – AIA), citocininas e giberelinas, os quais promovem o alongamento celular, o desenvolvimento radicular e o crescimento de parte aérea (Spaepen; Vanderleyden; Remans *et al,* 2007; Glick *et al*, 2012). A ação desses hormônios pode resultar em incremento da massa radicular, com formação de mais raízes laterais e capilares mais abundantes, ampliando a capacidade de absorção de água e nutrientes (Ravanbakhsh *et al.*, 2018). Consequentemente, observa-se o estabelecimento de plantas mais vigorosas e adaptadas a condições ambientais adversas, como déficit hídrico e solos com baixa fertilidade (Marschner *et al*, 2012).

Além dos efeitos diretos, os MPCP atuam por meio de mecanismos indiretos. Dentre estes, salienta-se a indução de resistência sistêmica (IRS), pela qual o microrganismo ativa as defesas da planta, desencadeando respostas fisiológicas similares às induzidas por agentes patogênicos, porém sem causar danos (Van Loon; Bakker; Pieterse *et al*, 1998). Outro mecanismo consiste na competição por nutrientes e nichos ecológicos na rizosfera, onde os MPCP limitam a proliferação de fitopatógenos ao ocupar sítios de colonização e consumir recursos de forma mais eficiente (Weller *et al*, 1988). Ademais, a atividade microbiana contribui para a estruturação do solo, favorecendo a agregação de partículas, a aeração e a retenção hídrica (Tisdall; Oades *et al*, 1982).

Na cultura da soja, particularmente, realça-se a estratégia da coinoculação, que abrange a aplicação simultânea de *Bradyrhizobium* e outras bactérias promotoras de crescimento, como *Azospirillum brasilense*. Estudos demonstram que a coinoculação pode elevar significativamente o número de nódulos e a absorção de nutrientes, incrementando a produtividade da soja em condições de campo (Naoe *et al.*, 2020). Esses revestem-se de especial relevância em solos tropicais, como os do estado de Goiás, os quais frequentemente apresentam limitações nutricionais e condições climáticas que favorecem a adoção de estratégias biológicas adaptadas.

Dessa forma, os MPCP representam ferramentas indispensáveis na transição para sistemas agrícolas mais sustentáveis, constituindo-se em componentes essenciais dos bioinsumos aplicados na cultura da soja. Sua ação multifuncional, associada à viabilidade de aplicação em larga escala, confere a esses microrganismos papel central nas práticas agrícolas atuais e futuras.

## 2.2 Impacto dos MPCP no sistema radicular da soja

O sistema radicular da soja exerce papel fundamental no desempenho agronômico da cultura, responsável tanto pela absorção de água e nutrientes quanto pela interação com comunidades microbianas benéficas do solo. Morfologicamente, este sistema organiza-se em uma raiz principal pivotante que desenvolve um conjunto de raízes laterais, com subsequente ramificação em raízes secundárias e terciárias,

proporcionando elevada capacidade de exploração do perfil do solo (Taiz *et al*., 2017). A formação de nódulos radiculares através da simbiose com bactérias do gênero *Bradyrhizobium* constitui processo vital para a fixação biológica de nitrogênio (FBN), assegurando parcela considerável do nitrogênio requerido pela planta (Hungria *et al*., 2006).

A inoculação com microrganismos promotores de crescimento de plantas (MPCP) modula positivamente o desenvolvimento radicular da soja. Evidências científicas comprovam que bactérias como *Azospirillum brasilense*, *Bacillus subtilis* e *Pseudomonas fluorescens* potencializam o crescimento radicular, elevando os valores do comprimento, diâmetro e volume de raízes, bem como intensificam a proliferação de raízes laterais e capilares (Bashan; de-Bashan *et al*, 2010). Esse fenômeno relaciona-se, principalmente, à síntese de fitohormônios, particularmente ao ácido indolacético (AIA), que regula processos de elongação celular e estimula a divisão celular nas regiões meristemáticas das raízes (Spaepen; Vanderleyden; Remans *et al*, 2007).

Além do estímulo direto ao crescimento, os MPCP corroboram o incremento da eficiência na formação de nódulos radiculares. A coinoculação de *Bradyrhizobium* com outras bactérias benéficas tem demonstrado resultados positivos sob diferentes condições edafoclimáticas, inclusive em solos tropicais como os do Cerrado goiano (Naoe *et al*., 2020). Essa prática promove simultaneamente o incremento numérico e ponderal dos nódulos, incrementando sua funcionalidade e potencializando a fixação biológica de nitrogênio (FBN), com consequente elevação da assimilação de nitrogênio pela planta (Hungria *et al*., 2013).

Outro impacto relevante da atuação dos MPCP no sistema radicular refere-se à absorção de nutrientes. A expansão da área radicular promove exploração mais eficiente do solo, favorecendo a captação de macro e micronutrientes como fósforo, potássio, cálcio, magnésio, zinco e manganês. Adicionalmente, determinados MPCP atuam na solubilização de fosfatos e na mineralização da matéria orgânica, aumentando a disponibilidade de nutrientes essenciais (Sharma *et al*., 2013). Esse efeito reveste-se de particular importância em solos de baixa fertilidade, comuns no Cerrado brasileiro, onde o fósforo frequentemente ocorre em formas insolúveis.

O sistema radicular sob influência dos MPCP demonstra igualmente maior tolerância a condições de estresse abiótico, incluindo seca, salinidade e variações térmicas. A arquitetura radicular robusta e o volume expandido possibilitam maior capacidade de absorção hídrica durante períodos de déficit, otimizando a relação água-solo e intensificando a atividade microbiana rizosférica (Marschner *et al*, 2012). Essa resiliência reveste-se de importância decisiva para o êxito da cultura da soja em ambientes sujeitos à variabilidade climática, característica recorrente nas regiões produtoras goianas.

Portanto, a interação entre MPCP e o sistema radicular da soja configura-se como um componente-chave para o aumento da produtividade e a sustentabilidade da cultura. Ao induzir o desenvolvimento de raízes mais vigorosas e eficientes, associadas a uma microbiota benéfica, os MPCP viabilizam uma melhor adaptação da planta ao ambiente e uma maior capacidade de resposta às práticas agrícolas sustentáveis. A adoção dessas tecnologias, especialmente mediante coinoculação, consolida-se como realidade em diversos sistemas produtivos e deve ser fomentada como parte de uma abordagem integrada do manejo biológico do solo.

### 2.3 Relevância dos bioinsumos na produção de soja em Goiás

A demanda crescente por práticas agrícolas sustentáveis tem impulsionado a adoção de bioinsumos na produção de soja, sobretudo em regiões de expressiva relevância agrícola como o estado de Goiás. Os bioinsumos, definidos como produtos derivados de microrganismos, extratos vegetais ou substâncias naturais que promovem o crescimento vegetal ou o controle fitossanitário, tem adquirido notoriedade por conciliar produtividade, sustentabilidade e redução de custos (MAPA, 2020). Essa tendência alinha-se aos princípios da agricultura regenerativa, a qual privilegia o uso racional dos recursos naturais e a recuperação da biodiversidade edáfica.

Em Goiás, um dos principais polos da sojicultura nacional, a utilização de bioinsumos tem sido incentivada por políticas estaduais e federais que promovem práticas de manejo biológico. Iniciativas como o Programa Nacional de Bioinsumos, instituído pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), objetivam ampliar a disponibilidade e adoção desses produtos, reduzindo a dependência de insumos químicos importados e fomentando soluções adaptadas às condições edafoclimáticas regionais (MAPA, 2020). O bioma Cerrado, o qual abarca a maior parcela do território goiano, apresenta características pedoclimáticas que favorecem a resposta da soja à aplicação de microrganismos promotores de crescimento de plantas (MPCP), primordialmente em áreas com limitações naturais de fertilidade.

Os benefícios dos bioinsumos na cultura da soja manifestam-se por meio de múltiplas abordagens. Do ponto de vista agronômico, a inoculação com MPCP tem propiciado melhorias significativas na germinação, no vigor inicial, no crescimento vegetativo e na produtividade de grãos. Pesquisas de campo indicam que a coinoculação de *Bradyrhizobium japonicum* com *Azospirillum brasilense*, por exemplo, pode elevar o rendimento da soja em até 16% em comparação com a inoculação convencional (Hungria *et al*., 2013; Naoe *et al*., 2020). Esses ganhos associam-se à maior nodulação, ao desenvolvimento radicular mais robusto e à maior absorção de nutrientes, especialmente nitrogênio, fósforo e potássio (Bashan; de-Bashan, 2010; Sharma *et al.*, 2013).

Sob a perspectiva econômica, a substituição parcial de fertilizantes e defensivos químicos por bioinsumos representa uma estratégia eficaz para a redução dos custos de produção. Como resultado, um expressivo número de produtores tem registrado melhora na margem de lucro da atividade, aliada à menor exposição às flutuações cambiais e de preços no mercado internacional de insumos (Embrapa, 2021). Ademais, o uso de bioinsumos pode favorecer a adequação a certificações ambientais e sistemas de produção orgânica, ampliando o acesso a nichos de mercado diferenciados e mais exigentes.

Os impactos ambientais também mostram-se expressivos. A aplicação de produtos biológicos geralmente resulta em menor acúmulo de resíduos tóxicos no solo e nos corpos hídricos, atenuando os riscos à biodiversidade e as reservas de água. A presença de MPCP na rizosfera auxilia na melhoria da estrutura edáfica, o incremento da atividade microbiana benéfica e a recuperação da saúde do solo a longo prazo (Tisdall; Oades *et al*, 1982; Glick *et al*, 2012). Em regiões goianas submetidas à monocultura por décadas, os bioinsumos configuram uma ferramenta estratégica para reverter processos degradativos e estimular sistemas produtivos mais equilibrados.

Relatos técnicos e resultados de pesquisas conduzidas pela Embrapa e instituições parceiras reforçam o potencial dos bioinsumos na sojicultura goiana.

Produtores que adotaram tecnologias biológicas têm reportado avanços tanto nos índices de produtividade quanto nos parâmetros qualitativos do solo, na sanidade da cultura e na resiliência das lavouras ante estresses climáticos e fitossanitários (Embrapa *et al*, 2021). Essas evidências sugerem que o emprego racional e integrado de MPCP e demais bioinsumos deve ser consolidado como diretriz estratégica para o desenvolvimento agrícola estadual.

Deste modo, a expansão do uso de bioinsumos na cultura da soja em Goiás insere-se em uma conjuntura técnica e econômica favorável, reforçada por políticas públicas, avanços científicos e a demanda por sistemas agrícolas mais resilientes. Com base em evidências consistentes, constata-se que os bioinsumos, sobretudo aqueles formulados com MPCP, representam instrumentos indispensáveis para o fortalecimento de uma agricultura regional mais produtiva, economicamente viável e ambientalmente responsável.

## 3 METODOLOGIA

Este estudo foi conduzido em casa de vegetação na Embrapa Arroz e Feijão, localizada em Santo Antônio de Goiás, Goiás, Brasil, durante o mês de abril de 2024. O delineamento experimental adotado foi inteiramente casualizado, compreendendo cinco tratamentos e dez repetições.

Os tratamentos envolveram a microbiolização de sementes de soja (cultivar NS 6906) com os seguintes microrganismos multifuncionais: *Serratia marcensces* (*Serratia marcescens*), *Bacillus sp.* (BRM 63573), *Azospirillum brasilense* (AB V5) e *Trichoderma koningiopsis* (*Trichoderma koningiopsis*), aplicados individualmente e em combinação múltipla. A seleção desses microrganismos baseou-se em suas propriedades bioquímicas previamente reconhecidas como vantajosas para cultivos agrícolas, sendo todas as estirpes mantidas na coleção de microrganismos da Embrapa Arroz e Feijão.

Antes do processo de microbiolização, as sementes foram submetidas à desinfestação superficial mediante imersão em hipoclorito de sódio 7,5% por sete minutos, seguida de lavagem em etanol 70% por cinco minutos e três enxágues consecutivos em água destilada esterilizada, com duração de um minuto cada. Após esse processo, as sementes foram secas em temperatura ambiente (29°C). A microbiolização foi realizada por meio de imersão das sementes em suspensões bacterianas sob agitação constante a 125 rpm, com tempo de exposição de quatro horas para a cultura da soja (Silva *et al.*, 2022).

As rizobactérias foram cultivadas em meio sólido (ágar nutriente) e subsequentemente transferidas para meio líquido 523 (caldo nutriente) (Kado; Heskett, 1970), sendo incubadas por 24 horas a 28°C em agitador orbital. A concentração das suspensões foi ajustada para a densidade óptica de A540 = 0,5 (equivalente a $10^8$ UFC – Unidades Formadoras de Colônias) utilizando espectrofotômetro Hach DR 2800®. Aplicou-se 125 mL da suspensão bacteriana para cada 50 g de sementes, assegurando cobertura uniforme do inoculante.

Após a inoculação e secagem, as sementes foram transferidas para vasos plásticos de 500 mL contendo substrato composto por mistura de solo e areia grossa na proporção 1:1. O solo usado foi classificado como Latossolo Vermelho de textura argilosa, coletado na camada arável (0,0–0,20 metros). A análise química do solo revelou os seguintes atributos (Claessen *et al*, 1997): pH em $H_2O$ = 5,9; matéria orgânica (MO) = 17,6 g $dm^{-3}$; Mehlich-P = 26,6 mg $dm^{-3}$; K = 3 $mmol_a$ $dm^{-3}$; $Ca^{2+}$ = 20 $mmol_a$ $dm^{-3}$; $Mg^{2+}$ = 6 $mmol_a$ $dm^{-3}$; $Al^{3+}$ = 0 $mmol_a$ $dm^{-3}$; H + Al = 20 $mmol_a$ $dm^{-3}$;

saturação por bases (SB) = 31 $mmol_a$ $dm^{-3}$; CTC potencial (T) = 50 $mmol_a$ $dm^{-3}$; CTC efetiva (t) = 36 $mmol_a$ $dm^{-3}$.

Foram semeadas duas sementes em cada recipiente plástico, sem aplicação de fertilizantes. Aos cinco dias após a emergência, realizou-se o desbaste, mantendo-se a plântula mais vigorosa. Não houve controle de temperatura ou umidade relativa no ambiente experimental. A irrigação foi efetuada diariamente para manter a umidade próxima à capacidade de campo, com lâmina média de 5 mm aplicada pela manhã.

Aos 14 dias depois do plantio, as mudas foram cuidadosamente extraídas dos recipientes mediante lavagem do sistema radicular, e os brotos foram coletados para análise do sistema radicular. As raízes foram distribuídas sobre superfície de etileno vinil acetato (EVA) na cor preta para captura de imagens com câmera digital posicionada a 30 cm de distância, utilizando suporte cilíndrico de acrílico para padronização.

A análise das imagens foi processada no software WinRhizo Pro 2012®, obtendo-se as seguintes variáveis: comprimento total da raiz (LengR, cm), diâmetro radicular (DiamR, mm), área superficial total da raiz (ÁreaS, cm²) e volume de raízes (VolR, cm³). Esses parâmetros possibilitaram a avaliação quantitativa do desenvolvimento, saúde e adaptação das plantas ao ambiente (Böhm *et al*., 1979). Com isso, os dados foram submetidos à análise de variância utilizando-se o software estatístico Sisvar 5.6 (Ferreira *et al*., 2019), com posterior aplicação do teste de comparação de médias a 5% de probabilidade, quando pertinente. A apresentação dos resultados seguiu as normativas previamente estabelecidas no TCC I e as diretrizes da ABNT.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Pela análise de variância, verificou-se efeito significativo dos tratamentos com microrganismos multifuncionais sobre o comprimento total da raiz, área da superfície radicular, diâmetro médio e volume de raízes de plântulas de soja, aos 14 dias após a semeadura. As diferenças observadas foram expressivas ao nível de 1% de probabilidade pelo teste F, conforme apresentado na Tabela 1.

Entre os tratamentos, *Serratia marcescens* sobressaiu-se como o mais eficiente. Porém, esse tratamento resultou em menor área de superfície radicular. Em relação ao comprimento radicular (CompR), os maiores valores foram registrados nas plantas tratadas com *Azospirillum brasilense* (AB-V5), as quais alcançaram 50,07 cm, enquanto o controle apresentou somente 38,73 cm (Figura 1A). Esse aumento de aproximadamente 29% no que concerne ao controle sugere considerável contribuição do microrganismo para a expansão do sistema radicular. Em contrapartida, o tratamento com *Bacillus sp*. (BRM 63573) apresentou desempenho inferior (33,39 cm), ficando abaixo do valor verificado no controle (38,73 cm).

**Tabela 1** - Análise de variância evidenciando o efeito dos microrganismos após 14 dias.

| Tratamentos | CompR (cm) | DiamR (mm) | AreaS (cm²) | VolR (cm³) |
|---|---|---|---|---|
| Controle | 38,73 b | 0,99 b | 48,53 a | 0,38 b |
| BRM 32114 (*Serratia marcescens*) | 41,53 ab | 1,20 ab | 33,61 b | 0,60 ab |
| BRM 63573 (*Bacillus* sp.) | 33,39 b | 1,53 a | 42,28 ab | 1,01 ab |
| AB-V5 (*Azospirillum brasilense*) | 50,07 a | 1,48 ab | 49,41 a | 1,18 ab |
| BRM 53736 (*Trichoderma koningiopsis*) | 38,91 b | 1,67 a | 47,57 a | 1,24 a |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Coinoculação | 41,59 ab | 1,65 a | 42,45 ab | 1,24 a |
| **Anova- Probabilidade do teste F** | | | | |
| Tratamentos (T) | 0,003** | 0,001** | 0,001** | 0,008** |
| CV (%) | 14,31 | 22,19 | 13,52 | 53,11 |

Análise de variância referente ao comprimento total da raiz (LengR), diâmetro médio da raiz (DiamR) área total da superfície da raiz (AreaS) e volume da raiz (VolR) de plântulas de soja, em função do tratamento com microrganismos multifuncionais, aos 14 dias após a semeadura. Os tratamentos com microrganismos mostraram efeitos significativos ($p < 0,01$) no comprimento, diâmetro, área e volume das raízes das plantas de soja, com variação entre 13,52% e 53,11%. A letra "a" indica os tratamentos que apresentaram médias estatisticamente superiores, enquanto a letra "b" representa médias inferiores, conforme o teste de Tukey.

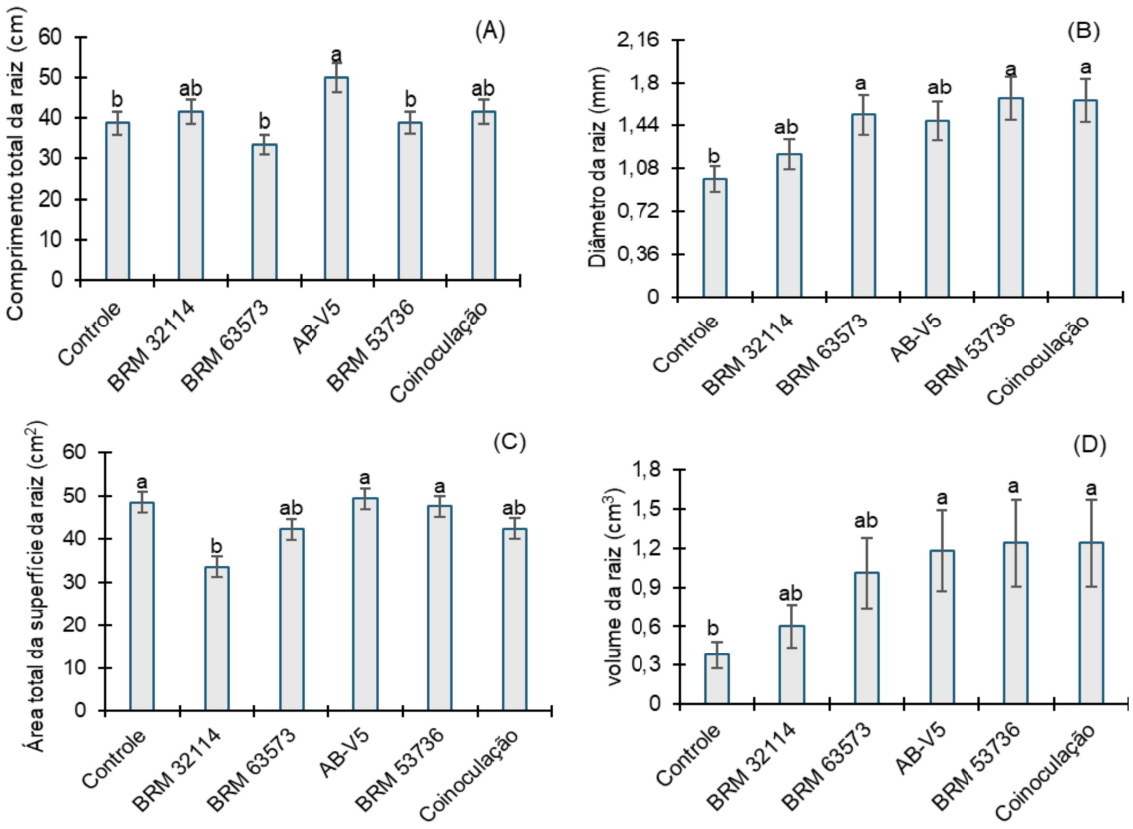
**Fonte:** Elaborado pelos autores (2025).

Quanto ao diâmetro radicular (DiamR), os tratamentos com *Trichoderma koningiopsis* (1,67 mm), coinoculação (1,65 mm) e *Bacillus sp*. (1,53 mm) superaram expressivamente o controle (0,99 mm) (Figura 1B). Esse incremento dimensional sugere maior robustez estrutural e potencial de reserva de assimilados, fatores que favorecem tanto a absorção nutricional quanto a tolerância a condições de estresse. Em consonância com esses achados, estudos com arroz (*Oryza sativa L.*) e milho (*Zea mays L.*) inoculados com *Trichoderma koningiopsis* igualmente registraram aumento na espessura radicular e melhora no desempenho fisiológico sob déficit hídrico (Reyes *et al.*, 2024; Asghar *et al.*, 2024).

No que se refere à área superficial radicular (AreaS), os tratamentos Controle (48,53 cm²), *Azospirillum brasilense* (49,41 cm²) e *Trichoderma koningiopsis* (47,57 cm²) não diferiram estatisticamente entre si (Figura 1C). Em contraste, *Serratia marcescens* resultou em valor significativamente inferior (33,61 cm²; $p \leq 0,01$), sugerindo possível efeito inibitório no desenvolvimento radicular. Fenômeno análogo foi documentado em pesquisas com feijão-comum (*Phaseolus vulgaris L.*) e trigo (*Triticum aestivum L.*), nas quais determinadas cepas de *Serratia* afetaram negativamente a microbiota rizosférica e a eficiência de absorção de nutrientes (Silva *et al*., 2022).

Quanto ao volume radicular (VolR), registraram-se incrementos expressivos nos tratamentos com *Trichoderma koningiopsis* (1,24 cm³), coinoculação (1,24 cm³) e *Azospirillum brasilense* (1,18 cm³) em comparação ao controle (0,38 cm³) (Figura 1D). Esse substancial aumento evidencia a habilidade desses microrganismos em potencializar o crescimento tridimensional do sistema radicular, ampliando o volume de solo explorado e, consequentemente, a capacidade de absorção hidromineral. Em pesquisas anteriores em soja (*Glycine max L. Merrill*) e milho (*Zea mays L.*), foram relatados efeitos similares, com incrementos de até 40% no volume radicular e na eficiência do uso da água, refletindo em ganhos produtivos significativos (Biasotto, 2025).

**Figura 1 -** Comprimento total da raiz (LengR), diâmetro médio da raiz (DiamR), área total da superfície da raiz (AreaS) e volume da raiz (VolR) de plântulas de soja (cultivar NS 6906), em função do tratamento com microrganismos multifuncionais, aos 14 dias após a semeadura. As médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).




**Fonte:** Elaborado pelos autores (2025).

A ação conjunta de *Azospirillum brasilense* e *Trichoderma koningiopsis* pode estar associada à produção de substâncias promotoras de crescimento, como ácido indolacético, citocininas e giberelinas, além da indução de mecanismos de defesa nas plantas. Esses resultados convergem com os achados de Carvalho *et al*, (2023) e Aarti *et al*. (2024), os quais descreveram efeitos positivos da coinoculação em sorgo (*Sorghum bicolor L. Moench*) e feijão-caupi (*Vigna unguiculata L. Walp*), com incrementos na biomassa e no teor de clorofila foliar.

Os resultados obtidos reforçam o potencial de aplicação desses microrganismos em grandes culturas agrícolas. Na soja (*Glycine max L. Merrill*), a inoculação combinada de *Azospirillum brasilense* e *Bradyrhizobium japonicum* mostrou eficácia no aumento do desenvolvimento radicular e da produtividade de grãos. No milho (*Zea mays L.*), a coinoculação potencializa o acúmulo de nitrogênio e a eficiência fotossintética (Biasotto *et al*, 2025). No trigo (*Triticum aestivum L.*) e no arroz (*Oryza sativa L.*), a utilização de *Trichoderma koningiopsis* e *Bacillus* tem sido associado à maior resistência ao estresse salino e à melhoria das propriedades físicas do solo, revelando a versatilidade de aplicação desses bioinsumos em diferentes sistemas produtivos.

Portanto, a inoculação com *Azospirillum brasilense* e *Trichoderma koningiopsis* destacou-se pela promoção do crescimento radicular e pela compatibilidade com sistemas agrícolas diversos. No entanto, a coinoculação múltipla envolvendo todas as estirpes avaliadas não resultou em ganhos adicionais, sugerindo a ocorrência de interações antagônicas entre os microrganismos. Assim, a seleção criteriosa de combinações microbianas compatíveis revela-se fundamental para potencializar o desenvolvimento vegetal e consolidar o uso de bioinsumos como estratégia

sustentável nas principais cadeias produtivas do Brasil, particularmente nas culturas de soja, milho, trigo e arroz.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho demonstrou que a inoculação com microrganismos multifuncionais influenciou significativamente o desenvolvimento radicular de plântulas de soja (*Glycine max L. Merrill*). Entre os tratamentos avaliados, destacaram-se *Azospirillum brasilense* e *Trichoderma koningiopsis*, que promoveram incrementos expressivos no comprimento, diâmetro e volume das raízes, refletindo em maior capacidade de exploração do solo e potencial de absorção de água e nutrientes.

Os resultados indicam que esses microrganismos atuam como promotores naturais de crescimento, provavelmente em decorrência da produção de hormônios vegetais e do estabelecimento de uma rizosfera microbiologicamente mais ativa. Essa interação benéfica reforça o potencial dos bioinsumos como ferramentas sustentáveis para substituir parcialmente fertilizantes nitrogenados de síntese, o que contribui para sistemas agrícolas mais equilibrados e ambientalmente responsáveis.

Ao comparar os efeitos observados com outras culturas de relevância econômica, como milho (*Zea mays L.*), trigo (*Triticum aestivum L.*) e arroz (*Oryza sativa L.*), constatou-se que a resposta positiva à inoculação é um fenômeno recorrente. Diversos estudos apontam que a associação com *Azospirillum brasilense* e *Trichoderma koningiopsis* resulta em maior vigor vegetal, tolerância a estresses abióticos e incremento de produtividade, confirmando a versatilidade de aplicação desses microrganismos em diferentes espécies cultivadas.

Contudo, a coinoculação, envolvendo todos os microrganismos testados simultaneamente, não resultou em desempenho superior aos tratamentos individuais, o que sugere que combinações microbianas inadequadas podem gerar efeitos antagônicos. Esse achado ressalta a relevância da seleção criteriosa de estirpes microbianas compatíveis, considerando particularidades da cultura, do solo e das condições ambientais específicas.

Os resultados obtidos neste estudo apontam que a utilização de microrganismos benéficos é uma alternativa viável para o fortalecimento do sistema radicular de soja, com implicações diretas na sustentabilidade da produção agrícola. Logo, a adoção dessa biotecnologia em escala comercial pode reduzir custos com fertilização, melhorar a eficiência no uso de recursos naturais e contribuir para sistemas produtivos mais resilientes e de menor impacto ambiental.

Desta forma, com este trabalho, confirma-se o potencial de *Azospirillum brasilense* e *Trichoderma koningiopsis* como agentes promotores de crescimento vegetal e reforça a importância contínua da pesquisa científica na busca por soluções inovadoras e sustentáveis para as grandes culturas do agronegócio brasileiro.

## 6 AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Isabelly Vitória Lucas Ferreira, Especialista em Agropecuária pela UNIFESSA, Mestre em Biotecnologia Aplicada à Agropecuária pela UFRA e Doutoranda em Agronomia com ênfase em Produção Vegetal, pela imprescindível orientação e apoio ao longo deste projeto.

À Embrapa Arroz e Feijão, localizada em Santo Antônio de Goiás (GO), pela disponibilização da infraestrutura e pelo suporte técnico necessários para a condução dos experimentos e consolidação desta pesquisa.

## REFERÊNCIAS

AARTI; SUJATA; PARMAR, S.; KUMAR, A. Plant Growth Promoting Rhizobacteria: Their potential in sustainable Agriculture. **Journal of Science Innovations and Nature of Earth**, v. 4, p. 40-46, 2024. DOI: 10.59436/Jsianev4i2/270. Acesso em: 25 set. 2025.

ASGHAR, Waleed; CRAVEN, Kelly D.; KATAOKA, Ryota; MAHMOOD, Ahmad; ASGHAR, Naveed; RAZA, Taqi. A aplicação de *Trichoderma* spp., um fungo antigo, mas com novas aplicações úteis, na intensificação sustentável da saúde do solo: uma estratégia abrangente para enfrentar os desafios. ***Plant Stress***, v. 12, p. 100455, 2024. DOI: 10.1016/j.stress.2024.100455. Acesso em: 5 set. 2025.

BASHAN, Y.; DE-BASHAN, L. E. How the plant growth-promoting bacterium *Azospirillum* promotes plant growth — a critical assessment. **Advances in Agronomy**, v. 108, p. 77–136, 2010. Disponível em: https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)08002-8. Acesso em: 20 out. 2025.

BIASOTTO, J. V. C. **Influência da inoculação com microrganismos promotores de crescimento de plantas no crescimento e produtividade da cultura da soja**. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista (Unesp), Jaboticabal, 2025. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/3519525b-f4cd-4edc-8af9-1b38050bfd54/content. Acesso em: 5 set. 2025.

CARVALHO, R. C. da S. **Co-inoculação com microrganismos promotores de crescimento de plantas no desenvolvimento e produtividade da soja.** 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista (Unesp), Jaboticabal, 2023. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/entities/publication/6c4825ba-37f5-4540-bf1e-d75b805ea9cd. Acesso em: 25 set. 2025.

EMBRAPA. **Bioinsumos**: produtores relatam experiências positivas com o uso de produtos biológicos. Brasília: Embrapa, 2021. Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/62507735/. Acesso em: 25 maio 2025.

GLICK, B. R. Plant Growth-Promoting Bacteria: Mechanisms and Applications. **Scientifica**, Cairo, v. 2012, art. 963401, 2012. Disponível em: https://doi.org/10.6064/2012/963401. Acesso em: 22 set. 2025.

HARMAN, G. E.; HOWELL, C. R.; VITERBO, A.; CHET, I.; LORITO, M. Trichoderma species—opportunistic, avirulent plant symbionts. **Nature Reviews Microbiology**, Basingstoke, v. 2, n. 1, p. 43-56, 2004. Disponível em: https://www.nature.com/articles/nrmicro797. Acesso em: 16 abr. 2025.

HUNGRIA, M.; NOGUEIRA, M. A.; CAMPO, R. J.; FRANCO, A. A. Coinoculação de soja com *Bradyrhizobium spp*. e *Azospirillum brasilense*: uma nova tecnologia para incrementar a produtividade com sustentabilidade. **Circular Técnica**, Londrina, n.

35, 2013. Disponível em: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/87720/1/CircTec35.pdf. Acesso em: 22 set. 2025.

HUNGRIA, M.; CAMPO, R. J.; MENDES, I. C. **Fixação biológica de nitrogênio na cultura da soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2007. 84 p. (Documentos, 283). Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/217205/fixacao-biologica-de-nitrogenio-na-cultura-da-soja. Acesso em: 1 abr. 2025.

HUNGRIA, M.; NOGUEIRA, M. A.; CAMPO, R. J.; FRANCO, A. A.; MENDES, I. C. Inoculação com *Bradyrhizobium spp*. em soja: comparativo entre métodos de aplicação e respostas agronômicas em diferentes condições de cultivo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 5, p. 725–735, 2006. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S0100-204X2006000500014. Acesso em: 29 set. 2025.

KADO, C. I.; HESKETT, M. G. Selective media for isolation of *Agrobacterium*, *Corynebacterium*, *Erwinia*, *Pseudomonas*, and *Xanthomonas*. **Phytopathology**, v. 60, n. 6, p. 969-976, 1970. DOI: 10.1094/phyto-60-969. Disponível em: https://www.apsnet.org/publications/phytopathology/backissues/Documents/1970Abstracts/phyto60_969.htm. Acesso em: 16 abr. 2025.

LENNON, S. **Microrganismos para o manejo da fertilidade do solo são promotores do crescimento da soja**. 2023. Disponível em: https://www.agrolink.com.br/noticias/microrganismos-para-o-manejo-da-fertilidade-do-solo-sao-promotores_485682.html. Acesso em: 1 abr. 2025.

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Programa Nacional de Bioinsumos**. Brasília: MAPA, 2020. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/bioinsumos. Acesso em: 25 maio 2025.

MARSCHNER, P. (Ed.). **Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants**. 3. ed. Amsterdam: Academic Press, 2012. Disponível em: https://home.czu.cz/storage/737/65060_Mineral-Nutrition-of-higher-plants-Marschner-2012.pdf. Acesso em: 29 set. 2025.

MASTOURI, F.; BJÖKMAN, T.; HARMAN, G. E. *Trichoderma harzianum* enhances antioxidant defense of tomato seedlings and resistance to water deficit. **Molecular Plant-Microbe Interactions**, v. 23, n. 7, p. 962-972, 2010. Disponível em: https://doi.org/10.1094/MPMI-09-11-0240. Acesso em: 16 abr. 2025.

NAOE, A. L.; DE ALMEIDA, V. D. F.; ALMEIDA, L. S. D.; BRITO, D. R. B.; CUNHA, L. G. B.; MARTINS, E. L.; DE OLIVEIRA, A. L. M. Effect of co-inoculation with *Bradyrhizobium japonicum* and *Azospirillum brasilense* in soybean under field conditions. **Symbiosis**, v. 81, p. 145–153, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s13199-020-00682-2. Acesso em: 15 set. 2025.

PLANTIO DIRETO. **Bactérias do gênero *Bacillus* podem atuar como promotoras do crescimento da soja**. [S.l.: s.n.], 2025. Disponível em:

https://plantiodireto.org.br/bacterias-do-genero-bacillus-podem-atuar-como-promotoras-do-crescimento-da-soja. Acesso em: 15 set. 2025.

RAVANBAKHSH, M.; SCHMID, B.; BETTENDORFF, E.; TRAMPONT, M.; MEZIANI, K.; BLOUIN, M.; MARION-POLL, A. Root trait responses to drought are more heterogeneous than leaf trait responses. **Functional Ecology**, Hoboken, v. 32, n. 1, p. 29–39, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1111/1365-2435.12991. Acesso em: 10 set. 2025.

REYES VERA, H., QUINTEROS CEVALLOS, F., MOSQUERA QUIÑÓNEZ, E. Y BARREZUETA MALDONADO, A. (2024). Un estudio bibliométrico de los principales reguladores de crecimiento: Citoquininas, Auxinas y Giberelinas en las plantas. Maestro y Sociedad, 21(4), 2202-2207.Disponível em: https://maestroysociedad.uo.edu.cu. Acesso em: 15 set. 2025.

SILVA, ANDRÉ ALISSON RODRIGUES DA. *Ácido salicílico na indução à tolerância da gravioleira ao estresse salino: tese (Doutorado em Engenharia Agrícola)*. Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Campina Grande, 2022. Disponível em: https://dspace.sti.ufcg.edu.br/bitstream/riufcg/27327/1/ANDR%C3%89%20ALISSON%20RODRIGUES%20DA%20SILVA%20%E2%80%93%20TESE%20%28PPGEA%29%202022-1.pdf. Acesso em: 15 set. 2025.

SHARMA, S. B.; SAYYED, I. Z.; TRIPATHI, M.; YADAV, V.; SINGH, V. Phosphate solubilizing microbes: sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils. **SpringerPlus**, Cham, v. 2, art. 587, 2013. Disponível em: https://doi.org/10.1186/2193-1801-2-587. Acesso em: 15 set. 2025.

SPAEPEN, S.; VANDERLEYDEN, J.; REMANS, R. Indole-3-acetic acid in microbial and microorganism-plant signaling. **FEMS Microbiology Reviews**, v. 31, p. 425–448, 2007. Disponível em: https://doi.org/10.1111/j.1574-6976.2007.00072.x. Acesso em: 5 set. 2025.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. Disponível em: https://www.meulivro.biz/biologia/biologia-vegetal/1467/fisiologia-e-desenvolvimento-vegetal-taiz-6-ed-pdf/. Acesso em: 5 out. 2025.

TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **Journal of Soil Science Oxford**, v. 33, n. 2, p. 141–163, 1982. Disponível em: https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1982.tb01755.x. Acesso em: 5 out. 2025.

VAN LOON, L. C.; BAKKER, P. A. H. M.; PIETERSE, C. M. J. Systemic resistance induced by rhizosphere bacteria. **Annual Review of Phytopathology**, Palo Alto, v. 36, p. 453–483, 1998. Disponível em: https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.36.1.453. Acesso em: 1 out. 2025.

VESSEY, J. K. Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 255, p. 571–586, 2003. Disponível em: https://doi.org/10.1023/A:1026037216893. Acesso em: 15 set. 2025.

WELLER, D. M. Biological control of soilborne plant pathogens in the rhizosphere with bacteria. **Annual Review of Phytopathology**, Palo Alto, v. 26, p. 379–407, 1988. Disponível em: https://doi.org/10.1146/annurev.py.26.090188.002115. Acesso em: 2 out. 2025.