

EFEITO DE MICRORGANISMOS PROMOTORES DE CRESCIMENTO NO DESENVOLVIMENTO RADICULAR DO FEIJÃO-COMUM: influência da inoculação microbiana sobre parâmetros do sistema radicular¹

EFFECT OF GROWTH-PROMOTING MICROORGANISMS ON THE ROOT DEVELOPMENT OF COMMON BEAN: influence of microbial inoculation on root system parameters

SILVA, André Luiz Procopio²

MELGAÇO, Larissa de Lima Alves³

CAETANO, Edmilson Junio Medeiros⁴

RESUMO

A utilização de microrganismos promotores de crescimento de plantas (MPCP) configura-se como uma alternativa sustentável para o incremento agrônomo. Este estudo objetivou analisar a influência da inoculação microbiana no desenvolvimento do sistema radicular do feijão-comum (*Phaseolus vulgaris* L., cultivar FC 402). A pesquisa foi conduzida na Embrapa Arroz e Feijão, em delineamento inteiramente casualizado, com cinco tratamentos e dez repetições. Foram avaliadas as espécies *Serratia marcescens*, *Bacillus* sp., *Azospirillum brasilense* e *Trichoderma koningiopsis*, aplicadas individualmente e em coinoculação. Os resultados demonstraram que os tratamentos com *Azospirillum brasilense* e *Trichoderma koningiopsis* proporcionaram os maiores valores de comprimento, área superficial e volume radicular. Esses parâmetros indicam um potencial superior desses microrganismos na promoção da absorção de nutrientes. Conclui-se que a inoculação com MPCP específicos é uma prática agrícola eficaz e sustentável, capaz de reduzir a dependência de fertilizantes químicos e induzir maior vigor ao sistema radicular do feijoeiro.

Palavras-chave: microrganismos promotores de crescimento; inoculação microbiana; *Phaseolus vulgaris*; sistema radicular; sustentabilidade.

ABSTRACT

The use of plant growth-promoting microorganisms (PGPM) is a sustainable alternative for agronomic growth. This study aimed to analyze the influence of microbial inoculation on the development of the root system of common bean (*Phaseolus vulgaris* L., cultivar FC 402). The research was conducted at Embrapa Rice and Beans in a completely randomized design, with five treatments and ten replications. The

1 Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro Universitário Mais - UNIMAIS, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Agronomia, no segundo semestre de 2025.

2 Acadêmico(a) do 10º Período do curso de Agronomia pelo Centro Universitário Mais - UNIMAIS. E-mail: andreluiz@aluno.facmais.edu.br

3 Acadêmico(a) do 10º Período do curso de Agronomia pelo Centro Universitário Mais - UNIMAIS. E-mail: larissalima@aluno.facmais.edu.br

4 Professor(a)-Orientador(a). Mestre em Engenharia Agrícola. Docente do Centro Universitário Mais - UNIMAIS. E-mail: edmilson.caetano@facmais.edu.br

species *Serratia marcescens*, *Bacillus sp.*, *Azospirillum brasilense*, and *Trichoderma koningiopsis* were evaluated, applied individually and in co-inoculation. The results showed that the treatments with *Azospirillum brasilense* and *Trichoderma koningiopsis* provided the highest values of length, surface area, and root volume. These parameters indicate a superior potential of these microorganisms in promoting nutrient absorption. It is concluded that inoculation with specific PGPM is an effective and sustainable agricultural practice, capable of reducing the dependence on chemical fertilizers and inducing greater vigor in the root system of common beans.

Keywords: growth-promoting microorganisms; microbial inoculation; *Phaseolus vulgaris*; root system; sustainability.

1 INTRODUÇÃO

O feijão-comum (*Phaseolus vulgaris* L.) é uma das leguminosas mais importantes para a alimentação humana, constituindo fonte significativa de proteína vegetal e desempenhando papel fundamental na segurança alimentar em países da América Latina e da África. Apesar de sua relevância, a cultura enfrenta limitações relacionadas ao manejo inadequado do solo e ao uso intensivo de insumos químicos, fatores que podem comprometer a produtividade e a sustentabilidade do sistema agrícola (Carbonell; Chiorato; Bezerra, 2021; IBGE, 2025). Ademais, por ser exigente em nutrientes e sensível a estresses ambientais, o feijoeiro impõe desafios adicionais à sua produtividade.

Nesse sentido, o uso de microrganismos promotores de crescimento de plantas (MPCP) surge como uma alternativa sustentável ao uso intensivo de fertilizantes químicos. Esses microrganismos, em especial as bactérias do solo, atuam na fixação biológica de nitrogênio, na solubilização de fosfatos e na produção de fitormônios, favorecendo diretamente a absorção de nutrientes e o desenvolvimento radicular (Vessey, 2003; Bashan; De-Bashan, 2010; Vacheron *et al.*, 2013; Gomes *et al.*, 2016; Buzo, 2025; Santos Silva *et al.*, 2025).

Estudos comprovam que microrganismos como *Azospirillum brasilense*, *Bacillus sp.*, *Trichoderma koningiopsis* e *Serratia marcescens* podem atuar de forma combinada, resultando em maior crescimento radicular e melhoria da eficiência produtiva das culturas (Rezende *et al.*, 2021; Gomes *et al.*, 2016; Santos Silva *et al.*, 2025). Adicionalmente, os inoculantes microbianos representam uma estratégia eficaz para sistemas agrícolas sustentáveis, pois permitem a redução da dependência de adubos químicos e diminuem os impactos ambientais (Kluthcouski; Stone; Aidar, 2009; Florêncio *et al.*, 2022).

Além dos benefícios diretos sobre o crescimento vegetal, a utilização de MPCP contribui para a resiliência das plantas frente a estresses ambientais, melhorando a absorção de água e nutrientes e favorecendo maior tolerância a condições adversas de solo e clima (Ribeiro *et al.*, 2011). Esse aspecto é particularmente relevante para o feijoeiro, cujo sistema radicular, predominantemente superficial, concentra-se nos primeiros 40 cm de profundidade, o que o torna altamente dependente de condições edáficas adequadas (Silva; Costa, 2003).

Pesquisas recentes reforçam essa perspectiva, ressaltando que os MPCP, além de promoverem o crescimento por meio da produção de fitormônios, também atuam na proteção enzimática contra estresses bióticos e abióticos, bem como melhoram a eficiência de absorção de nutrientes e água pelo sistema radicular (Queiroz; Oliveira, 2023). Assim, a inoculação microbiana consolida-se como uma

ferramenta que alia ganhos de produtividade à sustentabilidade agrícola. No Brasil, aproximadamente 78% da área plantada já utiliza inoculantes microbianos, ação que reduz significativamente a necessidade de fertilizantes nitrogenados e contribui para um equilíbrio nas práticas agrícolas (Florêncio *et al.*, 2022).

Nesse cenário, microrganismos como *Trichoderma* e *Bacillus subtilis* têm sido estudados pelo seu efeito benéfico no controle biológico de patógenos, promovendo maior equilíbrio no solo e a redução de perdas (Kluthcouski; Stone; Aidar, 2009). Gomes *et al.* (2016) corroboram essa visão, salientando que as interações no solo podem ocorrer de maneira benéfica, favorecendo o crescimento vegetal. Diante disso, o uso de inoculantes contendo bactérias e fungos benéficos representa uma alternativa biotecnológica promissora, capaz de potencializar o crescimento radicular e aumentar a produtividade do feijoeiro de maneira sustentável (Buzo, 2025). A identificação de combinações microbianas eficientes pode fornecer informações valiosas para produtores e técnicos agrícolas, incentivando práticas mais sustentáveis e economicamente viáveis (Hungria *et al.*, 2001; Coelho *et al.*, 2021).

Deste modo, este estudo tem como objetivo analisar os efeitos de doses individuais e combinadas de microrganismos no desenvolvimento radicular do feijão-comum. Parte-se da hipótese de que a aplicação de microrganismos, de maneira isolada ou combinada, pode propiciar o crescimento radicular da cultura, sendo os efeitos potencializados quando usados em associação, devido à ação sinérgica entre eles (Bashan *et al.*, 2014; Buzo, 2025). Portanto, torna-se substancial investigar experimentalmente os impactos dessas interações sobre os parâmetros radiculares da cultura do feijão-comum, a fim de gerar informações técnicas com aplicabilidade prática para os produtores.

2 ASPECTOS AGRONÔMICOS E BIOTECNOLÓGICOS DO DESENVOLVIMENTO RADICULAR DO FEIJOEIRO COMUM

2.1 A cultura do feijão-comum e sua importância agronômica

A produção de feijão-comum tem sido historicamente caracterizada pelo predomínio de pequenos produtores, os quais utilizam baixos níveis de insumos externos e estão voltados principalmente para o consumo doméstico e a comercialização local. Essa atividade constitui-se, portanto, como uma importante fonte de renda para os produtores, o que contribui diretamente para as economias locais (Wander; Silva, 2025). Do ponto de vista nutricional, a leguminosa apresenta potencial como alimento funcional, dada a presença de compostos bioativos em sua composição, os quais estão associados à prevenção de doenças crônicas (Barbosa; Gonzaga, 2012; Carbonell; Chiorato; Bezerra, 2021),

De acordo com dados da Embrapa (2023), o Brasil ocupa a segunda posição no ranking mundial de produção de feijão, com uma safra de 2,9 milhões de toneladas, o que representa 10,2 % da produção global. Apesar desse destaque, observa-se uma redução expressiva na área cultivada ao longo das últimas décadas, o qual passou de 4,28 milhões de hectares em 1974 para 2,42 milhões em 2023, uma queda de aproximadamente 43%. Essa contração da área está associada à intensificação tecnológica do setor e à consequente concentração produtiva em regiões mais especializadas. A produção nacional é ainda marcada por uma acentuada heterogeneidade estrutural: cerca de 97% das unidades produtoras cultivam menos de cinco hectares, enquanto um grupo restrito 0,5% das grandes lavouras é responsável por aproximadamente 75% da produção nacional (Embrapa,

2023). Complementarmente, estimativas do IBGE (2025) indicam que a produção nacional de feijão deve alcançar próximo de 3,1 milhões de toneladas, com os estados do Paraná, Minas Gerais e Goiás respondendo conjuntamente pela maior parcela da safra nacional.

Essa concentração produtiva evidencia que, embora a cultura mantenha grande relevância social por envolver milhares de pequenos produtores, a maior parte da oferta comercial é proveniente de propriedades tecnificadas e de maior porte. Paralelamente, a adoção de práticas de manejo modernas, como o uso de cultivares adaptadas, a correção do solo e a irrigação, tem possibilitado incrementos na produtividade média nacional, a qual atualmente situa-se entre 1.000 a 1.200 kg ha⁻¹, variando conforme a região e o sistema de cultivo adotado (IBGE, 2025).

Sob o ponto de vista agrônomo, o feijoeiro caracteriza-se como uma cultura sensível a estresses ambientais e à baixa fertilidade do solo. Essa suscetibilidade deve-se, em grande parte, ao seu sistema radicular pouco profundo e à sua elevada exigência nutricional, fatores que tornam o manejo adequado do solo e da água determinantes para o sucesso produtivo (Silva; Costa, 2003; Ribeiro *et al.*, 2011).

2.2 Desenvolvimento radicular e sua relação com o crescimento vegetal

A arquitetura e o funcionamento do sistema radicular condicionam diretamente o crescimento, a adaptação e a produtividade das plantas. Isto decorre de suas funções primordiais: a ancoragem mecânica ao substrato, a absorção e o transporte de água e nutrientes, bem como o armazenamento de fotoassimilados (Gonçalves; Lynch, 2014). No feijoeiro, o desenvolvimento radicular influencia a eficiência fisiológica da cultura, sendo determinante para o aproveitamento dos recursos do solo e para a tolerância a condições ambientais adversas. Além disso, a densidade e o comprimento dos pelos radiculares são características indispensáveis para a eficiência de absorção de nutrientes (Ribeiro *et al.*, 2011; Gonçalves; Lynch, 2014).

A estrutura radicular do feijão-comum é definida por uma raiz principal do tipo pivotante, da qual se originam raízes laterais finas e numerosas, concentradas predominantemente nas camadas superficiais do solo (Silva; Costa, 2003; Ribeiro *et al.*, 2011). Nesse sentido, o crescimento radicular é um processo dinâmico, continuamente influenciado por condições edafoclimáticas, disponibilidade de nutrientes, aeração, temperatura e umidade do solo. Ambientes com restrição de oxigênio, baixa porosidade ou excesso de sais, por exemplo, reduzem a respiração radicular e prejudicam o alongamento das raízes. Por outro lado, solos com estrutura estável e teores equilibrados de matéria orgânica promovem maior atividade radicular e uma exploração mais eficiente do perfil do solo (Böhm, 1979; Rezende *et al.*, 2021).

Quando as raízes exploram o ambiente de forma eficaz, resulta em uma maior absorção de água e nutrientes, a qual sustenta o crescimento vegetativo e o enchimento de grãos. Parâmetros como comprimento total, área superficial e volume de raízes, portanto, são utilizados como indicadores de vigor e eficiência fisiológica das plantas, refletindo a capacidade de adaptação a diferentes condições de cultivo (Böhm, 1979; Rezende *et al.*, 2021; Florêncio *et al.*, 2022).

Além das funções de sustentação e absorção, as raízes desempenham papéis regulatórios no metabolismo vegetal. Elas produzem e respondem a hormônios de crescimento, como auxinas, giberelinas e citocininas, os quais controlam processos de diferenciação celular e o equilíbrio entre o crescimento radicular e da parte aérea. Essa sinalização hormonal permite que a planta adapte seu desenvolvimento

conforme as condições ambientais, priorizando a expansão das raízes em situações de estresse hídrico ou nutricional (Spaepen; Vanderleyden; Remans, 2014).

2.3 Sustentabilidade agrícola e biotecnologias microbianas

A sustentabilidade agrícola consolida-se na adoção de práticas que conciliam o incremento da produtividade com a minimização de impactos ambientais, a viabilidade econômica e o fortalecimento da resiliência dos sistemas de produtivos (Teixeira, 2025). Nesse contexto, a biotecnologia aplicada à agricultura surge como uma das principais ferramentas para atender à demanda por segurança alimentar dentro de paradigmas de menor agressão ecológica. Logo, a aplicação de bioinsumos e o manejo biológico consolidam-se como estratégias centrais para a transição de um modelo convencional, intensivo em insumos externos, para sistemas agrícolas de base ecológica (Florêncio *et al.*, 2022).

A dependência de fertilizantes e defensivos sintéticos, apesar de ter impulsionado ganhos de produtividade nas últimas décadas, acarreta externalidades negativas, como a contaminação de ecossistemas, a depressão da biodiversidade microbiana do solo e a escalada dos custos de produção (Kluthcouski; Stone; Aidar, 2009). Como alternativa, a inoculação com microrganismos promotores de crescimento de plantas (MPCP) pode induzir a formação de raízes mais longas e ramificadas, ampliando a zona de exploração do perfil do solo. O mecanismo de ação desses microrganismos compreende a produção de fitormônios, a solubilização de nutrientes e a indução de repostas sistêmicas de tolerância a estresses, culminando em uma maior eficiência no uso de água e nutrientes (Vacheron *et al.*, 2013; Cruz-Hernández *et al.* 2022).

Tecnologias como a coinoculação, que associa bactérias e fungos benéficos, demonstram potencial sinérgico para promover raízes estruturalmente mais robustas e funcionalmente mais eficientes. Essa prática corrobora maior equilíbrio biótico do solo, eleva a biodisponibilidade de nutrientes e auxilia no controle supressivo de patógenos. Dessa forma, essa abordagem integra os princípios de sustentabilidade com ganhos de eficiência produtiva, fomentando sistemas agrícolas mais resilientes e com menor dependência de insumos químicos (Gonçalves; Lynch, 2014; Rezende *et al.*, 2021; Buzo, 2025; Teixeira, 2025).

Do ponto de vista socioeconômico, a adoção de biotecnologias microbianas traduz-se na redução de custos operacionais e na valorização de cadeias produtivas sustentáveis, com impactos especialmente positivos para pequenos e médios produtores (Coelho *et al.*, 2021). O dinamismo desse setor é atestado pelo crescimento de 15% do mercado de bioinsumos no Brasil, o qual engloba inoculantes fixadores de nitrogênio, solubilizadores de fósforo e agentes de controle biológico, na safra 2023/2024 em comparação com o ciclo anterior (Croplife Brasil, 2024).

3 METODOLOGIA

O experimento foi conduzido em abril de 2024 na Embrapa Arroz e Feijão, localizada no km 12 da rodovia GO-462, Zona Rural, município de Santo Antônio de Goiás, estado de Goiás. O período de experimental abrangeu um ciclo fenológico completo do feijão-comum, da germinação à maturação fisiológica, o que permitiu uma análise detalhada do desenvolvimento do sistema radicular.

O delineamento experimental adotado foi o inteiramente casualizado (DIC), constituído por cinco tratamentos e dez repetições. Os tratamentos envolveram

microbiolização de sementes de feijão-comum (cultivar FC 402) com os seguintes microrganismos multifuncionais: *Serratia marcescens* (BRM 32114), *Bacillus sp.* (BRM 63573), *Azospirillum brasilense* (AB V5) e *Trichoderma koningiopsis* (BRM 53736). Estes foram aplicados individualmente e em uma combinação que incluiu todas as estirpes.

Os microrganismos foram selecionados com base em suas características bioquímicas previamente identificadas como promotoras de crescimento vegetal, sendo todos provenientes e mantidos na coleção de culturas de microrganismos da Embrapa Arroz e Feijão. A avaliação dos efeitos dos tratamentos no desenvolvimento do sistema radicular das plantas foi realizada para complementar os estudos de campo em andamento.

Antes do processo de microbiolização, as sementes foram submetidas à desinfestação superficial para eliminação de contaminantes. O protocolo consistiu na imersão em solução de hipoclorito de sódio a 7,5% por sete minutos, seguida por imersão em etanol a 70% por cinco minutos. Em seguida, as sementes foram lavadas em três banhos consecutivos de água destilada esterilizada, com agitação manual de um minuto cada, para remoção completa de resíduos dos agentes desinfestantes. Após essa lavagem, as sementes foram secas em ambiente estéril sobre papel filtro à temperatura de 29°C. A microbiolização foi realizada pela imersão das sementes em suspensão bacteriana sob agitação constante a 125 rpm em shaker, por um período de duas horas para o feijão-comum, conforme descrito por Rezende *et al.* (2021).

Os inóculos bacterianos foram preparados a partir de culturas previamente crescidas em meio sólido Ágar Nutriente, que foram repicadas para meio líquido 523 (Caldo nutriente) (Kado; Heskett, 1970) e incubadas por 24 horas a 28°C em um incubadora com tecnologia. A concentração da solução bacteriana foi ajustada para densidade óptica de $A_{540} = 0,5$, correspondente a 10^8 Unidades Formadoras de Colônias por mL ($UFC\ mL^{-1}$), utilizando um espectrofotômetro Hach DR 2800®.

Para a inoculação, foram usados 125 mL de suspensão bacteriana para cada 50 g de sementes, garantindo a cobertura uniforme. Após a inoculação, o excesso de líquido foi drenado e as sementes foram secas superficialmente em papel filtro estéril. As sementes tratadas foram semeadas em vasos plásticos de 500 mL, preenchidos com substrato esterilizado composto por uma mistura de solo e areia grossa na proporção de 1:1. O solo, classificado como Latossolo Vermelho de textura argilosa, foi coletado na camada de 0,0–0,20 m de profundidade em área de encosta, certificando a representatividade do ambiente de cultivo.

A caracterização química inicial do solo seguiu metodologia descrita por Claessen (1997), apresentando os seguintes atributos: 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 de bases (SB) = $31\ mmol_a\ dm^{-3}$; capacidade de troca catiônica potencial (T) = $50\ mmol_a\ dm^{-3}$; capacidade de troca catiônica efetiva (t) = $36\ mmol_a\ dm^{-3}$.

Em cada recipiente plástico, foram semeadas duas sementes pré-inoculadas, sem adição suplementar de fertilizantes. Aos cinco dias após a emergência (DAE), realizou-se o desbaste, preservando-se uma muda mais vigorosa por vaso. A condução do experimento ocorreu em condições ambientais, sem controle de temperatura e umidade relativa. A irrigação foi realizada diariamente com água destilada, aplicando-se lâmina fixa de 5 mm pela manhã, visando manter a umidade do solo próximo à capacidade de campo.

Aos 14 dias após a semeadura (DAS), as mudas foram coletadas e o sistema radicular foi cuidadosamente lavado para remoção do substrato. Para capturar as

imagens das raízes, elas foram dispostas uniformemente sobre uma superfície de etilvinil acetato (EVA) de cor preta. A digitalização foi realizada com câmera digital posicionada a 30 cm de distância, utilizando suporte cilíndrico de acrílico para manter a padronização do ângulo e distância de captura.

As imagens foram analisadas por meio do software WinRhizo Pro 2012®, que possibilitou a quantificação das seguintes variáveis: comprimento total da raiz (LengR, cm), diâmetro médio (DiamR, mm), área superficial (ÁreaS, cm²) e volume radicular (VolR, cm³). Esses parâmetros forneceram indicadores quantitativos do desenvolvimento, saúde e adaptação do sistema radicular ao ambiente (Böhm, 1979). Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA) no software Sisvar 5.6 (Ferreira *et al.*, 2019).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise de variância revelou que os tratamentos exerceram influência significativa sobre o comprimento total, a área, o diâmetro médio e o volume das raízes de plântulas de feijão-comum aos 14 dias após a semeadura ($p < 0,05$, teste F), conforme demonstrado na Tabela 1.

Tabela 1. Comprimento total da raiz (LengR), área total da superfície da raiz (AreaS), diâmetro médio da raiz (DiamR) e volume da raiz (VolR) de plântulas de feijão-comum (cultivar FC 402), em função do tratamento com microrganismos multifuncionais, aos 14 dias após a semeadura.

Tratamentos	CompR (cm)	AreaS (cm ²)	DiamR (mm)	VolR (cm ³)
Controle	36,51 b	49,43 ab	0,92 b	0,29 b
BRM 32114 (<i>Serratia marcescens</i>)	30,04 b	39,23 b	1,04 ab	0,52 b
BRM 63573 (<i>Bacillus</i> sp.)	29,54 b	44,22 ab	1,08 ab	0,60 b
AB-V5 (<i>Azospirillum brasilense</i>)	47,82 a	52,51 a	1,47 a	1,58 a
BRM 53736 (<i>Trichoderma koningiopsis</i>)	48,11 a	42,50 ab	1,08 ab	1,02 ab
Coinoculação	35,78 b	45,96 ab	1,33 ab	1,40 a
Anova- Probabilidade do teste F				
Tratamentos (T)	0,004*	0,047*	0,006*	0,000*
CV (%)	26,66	17,5	24,08	51,36
ns, *, ** respectivamente não significativo, significativo a $p \leq 0,05$ e $p \leq 0,01$. CV: Coeficiente de variação.				

Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

No que se refere ao comprimento total da raiz (LengR), o tratamento com *Azospirillum brasilense* (AB-V5) apresentou o melhor desempenho, alcançando 47,82 cm, valor 31% superior ao controle (36,51 cm). Esse incremento expressivo evidencia o efeito dessa bactéria na indução do crescimento radicular, o que pode estar relacionado à sua capacidade de produzir auxinas (AIA) e outros reguladores de crescimento que promovem o alongamento celular. Resultados semelhantes foram observados por Baldani *et al.* (2014) e Singh e Pujari (2015), os quais relataram que bactérias do gênero *Azospirillum* sintetizam fitormônios capazes de estimular a divisão e o alongamento celular, ampliando o volume de solo explorado pelas raízes e, conseqüentemente, potencializando a absorção de água e nutrientes. Adicionalmente, *Trichoderma koningiopsis* (BRM 53736) também promoveu aumento considerável no comprimento radicular (48,11 cm), correspondendo a 32% acima do

controle, o que corroborou o efeito positivo de fungos desse gênero sobre o crescimento de tecidos subterrâneos. Estudos recentes indicam que *Trichoderma* estimula o desenvolvimento radicular por meio da produção de compostos voláteis orgânicos e metabólitos que modulam a sinalização hormonal nas plantas, promovendo o crescimento mesmo na ausência de contato físico direto com as raízes (Contreras-Cornejo *et al.*, 2024).

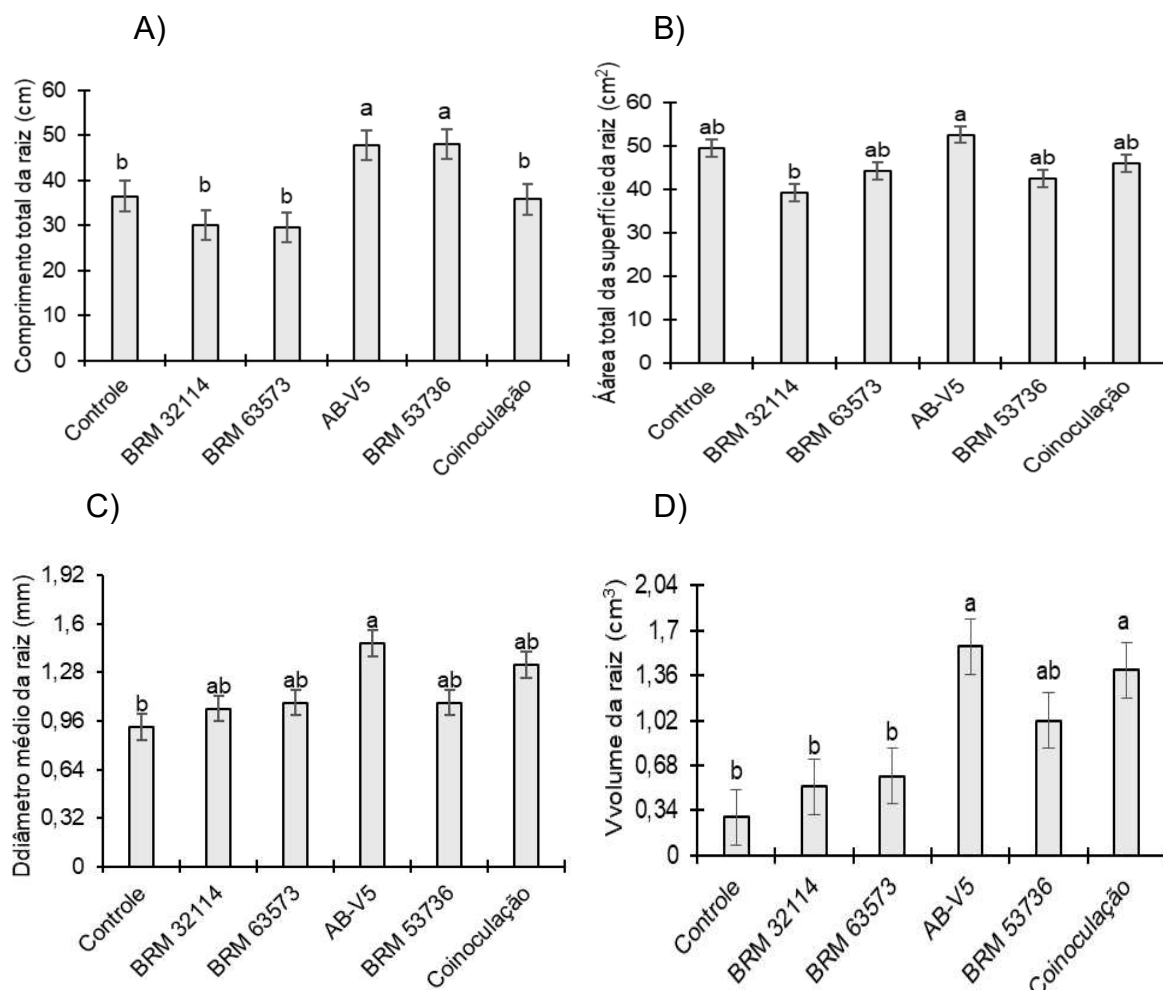
Para a área total da superfície radicular (AreaS), o maior valor foi obtido no tratamento com *Azospirillum brasilense* (52,51 cm²), representando um incremento de 6% em relação ao controle (49,43 cm²), conforme representado no Gráfico 1. Esse aumento prescreve maior densidade e ramificação das raízes, o que amplia a superfície de contato com o solo e favorece a absorção de nutrientes. Estudos conduzidos por Cerezini e Hungria (2018) e Cruz-Hernández *et al.* (2022) também observaram aumentos significativos na área radicular de leguminosas inoculadas com *Azospirillum*, atribuindo o efeito à maior disponibilidade de nitrogênio e ao estímulo da rizogênese por fitormônios microbianos.

No que diz respeito ao diâmetro médio das raízes (DiamR), o tratamento com *Azospirillum brasilense* novamente se destacou, alcançando 1,47 mm, valor 60% superior ao controle (0,92 mm). Esse aumento no diâmetro radicular sugere maior deposição de lignina e espessamento dos tecidos condutores, o que pode contribuir para uma maior eficiência no transporte de água e nutrientes. Segundo Cruz-Hernández *et al.* (2022), a presença de *Azospirillum* estimula a formação de raízes secundárias mais robustas, ampliando a capacidade de exploração do solo.

Em relação ao volume radicular (VolR), os maiores valores foram obtidos para *Azospirillum brasilense* (1,58 cm³) e para a coinoculação (1,40 cm³), representando, respectivamente, valores aproximadamente 5,45 e 4,83 vezes superiores ao controle (0,29 cm³). Esses resultados reforçam o efeito cumulativo da presença de microrganismos benéficos, os quais são capazes de induzir o crescimento volumétrico do sistema radicular por meio de diferentes mecanismos fisiológicos. A coinoculação entre bactérias e fungos multifuncionais demonstrou um efeito complementar, possivelmente devido à fixação biológica de nitrogênio promovida pelas bactérias e à solubilização de nutrientes e produção de compostos voláteis pelo fungo (*Trichoderma koningiopsis*), o que, em conjunto, favorece o metabolismo radicular e o crescimento celular (Oliveira *et al.*, 2022; Cruz-Hernández *et al.*, 2022).

Por outro lado, o controle e os tratamentos com *Serratia marcescens* (BRM 32114) e *Bacillus sp.* (BRM 63573) apresentaram desempenho inferior em todas as variáveis, revelando uma menor capacidade de estímulo ao crescimento radicular nas condições experimentais adotadas. Embora espécies desses gêneros possuam reconhecido potencial como rizobactérias promotoras de crescimento, seus efeitos podem variar conforme a cepa, a densidade populacional e as condições edafoclimáticas específicas (Vacheron *et al.*, 2013; Singh; Pujari, 2022).

Gráfico 1 – A - Comprimento total da raiz (LengR), B- Área total da superfície da raiz (AreaS), C- Diâmetro médio da raiz (DiamR) e D- Volume da raiz (VolR) de plântulas de plântulas de feijão-comum (cultivar FC 402), em função do tratamento com microrganismos multifuncionais, aos 14 dias após a semeadura.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

As médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

De forma geral, a superioridade do *Azospirillum brasilense* observada nos resultados corrobora sua eficácia e ampla aplicação em leguminosas, consoante ao documentado por Singh e Pujari (2015) e Batista *et al.* (2020). Esses autores ressaltam a notável capacidade dessa bactéria em promover o alongamento radicular, incrementar o acúmulo de matéria seca e otimizar a absorção de nutrientes, em especial nitrogênio e fósforo. Esses efeitos estão diretamente associados a mecanismos fisiológicos, como a síntese de AIA e o estímulo da atividade da H^+ -ATPase da membrana plasmática, os quais, em conjunto, intensificam o influxo de íons e água para o interior das células radiculares (Spaepen; Vanderleyden; Remans, 2014).

Portanto, os resultados obtidos confirmam a hipótese de que microrganismos promotores de crescimento de plantas (MPCP) exercem influência positiva no desenvolvimento inicial do feijão-comum, com ênfase para os tratamentos com *Azospirillum brasilense* e *Trichoderma koningiopsis*. A eficácia demonstrada por esses inoculantes mostra seu potencial biotecnológico para aumentar o vigor do sistema

radicular, reduzir a dependência de fertilizantes químicos e fomentar a transição para práticas agrícolas mais sustentáveis.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A inoculação com microrganismos promotores de crescimento de plantas (MPCP) influenciou positivamente o desenvolvimento do sistema radicular de plântulas de feijão-comum (*Phaseolus vulgaris* L.), confirmando o potencial desses agentes biológicos como bioestimulantes no estabelecimento inicial da cultura.

Dentre os tratamentos avaliados, *Azospirillum brasilense* (AB-V5) foi o mais eficaz, promovendo os maiores valores de comprimento total, área superficial, diâmetro médio e volume radicular. O incremento mais expressivo foi observado no volume de raízes, que foi aproximadamente 5,45 vezes superior ao controle. Esses resultados atestam a elevada capacidade dessa estirpe em estimular o crescimento radicular, provavelmente mediada pela produção de fitormônios, como auxinas, citocininas e giberelinas, que regulam processos de divisão e alongação celular, culminando em uma exploração mais eficiente do solo e na maior absorção de nutrientes.

A coinoculação também apresentou efeito positivo significativo, com volume radicular 4,83 vezes maior que o controle. Esse desempenho sugere a existência de um efeito sinérgico entre bactérias e fungos benéficos na rizosfera, potencializando os mecanismos fisiológicos relacionados à aquisição de água e nutrientes. De forma complementar, *Trichoderma koningiopsis* (BRM 53736), do mesmo modo, destacou-se pelo incremento no comprimento radicular, reforçando o potencial desse fungo como um agente bioestimulante, o qual atuou por meio de mecanismos como a solubilização de nutrientes e a liberação de compostos voláteis promotores de crescimento.

Em síntese, os resultados validam a eficácia do uso de inoculantes microbianos como uma alternativa sustentável para reduzir a dependência de fertilizantes químicos sintéticos, alinhando-se aos princípios de uma agricultura de base biológica. A aplicação de MPCP, em especial de *Azospirillum brasilense*, induziu a formação de um sistema radicular arquiteticamente mais vigoroso e funcional, com maior capacidade de exploração do perfil do solo e de adaptação a condições edáficas adversas. Por fim, recomenda-se, para trabalhos futuros, a condução de estudos em condições de campo, abrangendo diferentes cultivares e estádios fenológicos, a fim de validar os efeitos observados *in vivo* e estabelecer protocolos de inoculação que maximizem o desempenho fisiológico e a produtividade final da cultura do feijoeiro.

REFERÊNCIAS

BALDANI, J. I.; BALDANI, V. L. D.; MÜLLER, S. E.; VIDEIRA, S. S.; FUMIS, T. F.; CARNEIRO, A. M.; PEREIRA, G. S.; ARAÚJO, R. S. *Azospirillum* spp. and the development of plant growth-promoting rhizobacteria. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NITROGEN FIXATION WITH NON-LEGUMES, 2014. **Proceedings of the International Symposium on Nitrogen Fixation with Non-Legumes**. [S. l.]: [s. n.], 2014. p. 1-10. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1097382/1/SERIEDOC311ABSTRACTBOOKPGPR.pdf>. Acesso em: 05 out. 2025.

BASHAN, Y.; DE-BASHAN, L. How the Plant Growth-Promoting Bacterium

Azospirillum Promotes Plant Growth — A Critical Assessment. **Advances in Agronomy**, v. 108, p. 77-136, 2010. Disponível em: [10.1016/S0065-2113\(10\)08002-8](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)08002-8). Acesso em: 18 mar. 2025.

BASHAN, Y.; DE-BASHAN, L. E.; PRABHU, S. R.; SINGH, J.; MORENO, M. Advances in plant growth-promoting bacterial inoculant technology: formulations and practical perspectives (1998–2013). **Plant and Soil**, v. 378, p. 1–33, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1956-x>. Acesso em: 19 mar. 2025.

BÖHM, W. **Methods of studying root systems**. Berlin: Springer-Verlag, 1979. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-67282-8>. Acesso em: 5 out. 2025.

BUZO, F. de S. **Microrganismos promotores de crescimento de plantas**: seleção de espécies promissoras e combinações sinérgicas para a agricultura. 2025. 270 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Guaratinguetá, 2025. Disponível em: <https://hdl.handle.net/11449/295660>. Acesso em: 18 mar. 2025.

CARBONELL, S. A. M.; CHIORATO, A. F.; BEZERRA, L. M. C. A planta e o grão de feijão e as formas de apresentação aos consumidores. In: FERREIRA, C. M.; BARRIGOSI, J. A. F. (ed.). **Arroz e feijão**: tradição e segurança alimentar. Brasília, DF: Embrapa; Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2021. p. 101-116. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1134410>. Acesso em: 30 abr. 2025.

CEREZINI, P.; HUNGRIA, M. *Azospirillum*: benefits that go far beyond biological nitrogen fixation. **AMB Express**, v. 8, art. 73, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s13568-018-0608-1>. Acesso em: 05 out. 2025.

COELHO, L. G. F.; DIAS-FILHO, M. B.; XAVIER, G. R.; RANGEL, R. N.; GOMES, L. A. S.; NEIVA, T. J. F.; JÚNIOR, F. M. V.; MENDES, V. L. C. **A inoculação do feijoeiro no Brasil**: alternativas para aumentar a produtividade utilizando microrganismos promotores do crescimento vegetal. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2021. 47 p. (Documentos / Embrapa Cerrados, ISSN 1517-5111, ISSN online 2176-5081, 384). Disponível em: <https://www.bdpa.cnptia.embrapa.br>. Acesso em: 18 mar. 2025.

CONTRERAS-CORNEJO, H. A.; PÉREZ-VALDES, K.; DE LA FUENTE, G. T.; LÓPEZ-BUSTOS, R.; GÓMEZ, K. E.; GÓMEZ-RODRÍGUEZ, R.; MEJÍA-BALDERAS, K. L.; ÁVILA-MIRANDA, M. E. Mechanisms for plant growth promotion activated by *Trichoderma* in natural and managed terrestrial ecosystems. **Microbiological Research**, v. 265, p. 1-13, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.micres.2024.126349>. Acesso em: 5 out. 2025.

CROPLIFE BRASIL; FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS (FGV). **Diretrizes para um plano setorial de bioinsumos**: ações para o avanço do mercado de bioinsumos até 2030. São Paulo: FGV, 2024. Disponível em: <https://static.poder360.com.br/2025/01/diretrizes-para-um-plano-setorial-bioinsumos->

Acoes-para-o-Avanco-do-Mercado-de-Bioinsumos-novembro-2024_compressed.pdf.
Acesso em: 5 out. 2025.

CRUZ-HERNÁNDEZ, M. A.; CASTILLO-RODRÍGUEZ, V. M.; CARRILLO, E.; CASTRO, R.; BUSTILLOS-CRISTALES, M. R. *Azospirillum spp.* from Plant Growth-Promoting Bacteria to Their Use in Bioremediation. **Microorganisms**, v. 10, n. 5, p. 1-17, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/microorganisms10051057>. Acesso em: 05 out. 2025.

EMBRAPA. Feijão — Agro em Dados. *In: Portal Embrapa – Agro em Dados*. Brasília, DF: Embrapa, 2023. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agropensa/agro-em-dados/agricultura/feijao>. Acesso em: 5 out. 2025.

FLORENCIO, Camila; RIBEIRO, B. R.; SANTOS, L. S.; OLIVEIRA, C. A.; ARANTES, V. J. V.; LOURO, M. R. M. Avanços na produção e formulação de inoculantes microbianos visando uma agricultura mais sustentável. **Química Nova**, v. 45, n. 9, p. 1133–1145, 2022. DOI: <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170909>. Acesso em: 8 mai. 2025.

GOMES, E. A.; XAVIER, G. R.; RANGEL, R. N.; ZIMMERMANN, M. R. **Microrganismos promotores do crescimento de plantas**. Sete Lagoas, MG: Embrapa Milho e Sorgo, 2016. 51 p. (Documentos, 208). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1063799/1/doc208.pdf>. Acesso em: 18 mar. 2025.

GONÇALVES, S. L.; LYNCH, J. P. **Raízes de plantas anuais: tolerância a estresses ambientais, eficiência na absorção de nutrientes e métodos para seleção de genótipos**. Londrina: Embrapa Soja, 2014. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/999754/1/Raizesdeplantasanuaistoleranciaaestressesambientaiseficienciaaabsorcaodenutrientesemethodosparaselecaodegenotipos.pdf>. Acesso em: 5 out. 2025.

HUNGRIA, M.; FRANCHINI, J. C.; CAMPO, R. J.; SOUZA, E. M.; PEDROSA, F. O. **Fixação biológica de nitrogênio na cultura da soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2001. (Circular Técnica). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/459673/1/circTec35.pdf>. Acesso em: 18 mar. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Em março, IBGE prevê safra de 327,6 milhões de toneladas para 2025**. Rio de Janeiro: IBGE, 10 abr. 2025. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/43098-em-marco-ibge-preve-safra-de-327-6-milhoes-de-toneladas-para-2025>. Acesso em: 25 maio 2025.

KLUTHCOUSKI, João; STONE, Luís Fernando; AIDAR, Homero (ed.). **Fundamentos para uma agricultura sustentável, com ênfase na cultura do feijoeiro**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2009. 452 p. ISBN 978-85-7437-033-0. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/631908/1/lv->

fundamentos-agricultura-sustentavel-feijoeiro-2009.pdf. Acesso em: 25 maio 2025.

OLIVEIRA, J. R.; SILVA, M. L.; SANTOS, F. P.; SANTOS, B. S.; SANTOS, B. S.; PEREIRA, E. J. D. Leaf inoculation of *Azospirillum brasilense* and *Trichoderma harzianum* in hydroponic arugula improve productive components and plant nutrition and reduce leaf nitrate. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 52, e72755, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1983-40632022v5272755>. Acesso em: 05 out. 2025.

QUEIROZ, Antonio Tarcisio da Silva; OLIVEIRA, Bruno Costa de. Ação de microrganismos promotores do crescimento de plantas: uma revisão sistemática da literatura. **Revista PsiPro**, v. 2, n. 5, p. 98-112, set./out. 2023. Disponível em: <https://revistapsipro.com.br/index.php/psipro/article/view/75/63>. Acesso em: 24 set. 2025.

REZENDE, C. C.; HUNGRIA, M.; BRACCINI, A. L.; ASSUNÇÃO, I. L.; REZENDE, J. S. Physiological and agronomic performance of common bean treated with multifunctional microorganisms. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 16, n. 4, p. 1-9, 2021. Disponível em: 10.5433/1679-0359.2021v42n2p599. Acesso em: 20 mar. 2025.

RIBEIRO, Francisco Elias; SOUZA, E. R.; AMABILE, R. F.; LÉDO, F. J. da S.; ZILIO, M. **Recomendações técnicas para o cultivo do feijoeiro-comum (*Phaseolus vulgaris* L.) nas regiões Norte e Nordeste do Brasil**. Santo Antônio de Goiás, GO: Embrapa Arroz e Feijão, 2011. (Circular Técnica, n. 89). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/916406/1/CIRCTECNICA89.pdf>. Acesso em: 6 maio 2025.

SANTOS SILVA, G.; LUCAS MONTEIRO TAVARES, P.; STEPHAN NASCENTE, A.; VITÓRIA LUCAS FERREIRA, I.; RICARDO CABRAL CRUZ, D. Microrganismos promotores de crescimento no desenvolvimento das raízes de arroz de terras altas. **Revista Científica da UniMais**, v. 22, n. 2, p. 1–19, 2025. Disponível em: <https://revistas.facmais.edu.br/index.php/revistacientificafacmais/article/view/269>. Acesso em: 01 out. 2025.

SILVA, Heloisa Torres da; COSTA, Aline Oliveira. **Caracterização botânica de espécies silvestres do gênero *Phaseolus* L. (Leguminosae)**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2003. 40 p. (Documentos / Embrapa Arroz e Feijão, ISSN 1678-9644; 156). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/212488/1/doc156.pdf>. Acesso em: 01 out. 2025.

SINGH, G.; PUJARI, M. *Bacillus subtilis* as a Plant-Growth-Promoting Rhizobacteria: A Review. **Plant Archives**, v. 22, n. 2, p. 1-15, 2022. Disponível em: <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/pdf/10.5555/20230171270>. Acesso em: 05 out. 2025.

SINGH, G.; PUJARI, M. Maize growth promotion by inoculation with *Azospirillum brasilense* and metabolites of *Rhizobium tropici* enriched on lipo-

chitooligosaccharides (LCOs). **AMB Express**, v. 5, art. 71, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s13568-015-0154-z>. Acesso em: 05 out. 2025.

SPAEPEN, S.; VANDERLEYDEN, J.; REMANS, R. Indole-3-acetic acid in microbial and microorganism-plant signaling. **FEMS Microbiology Reviews**, v. 31, n. 4, p. 425-448, jul. 2007. Disponível em: 10.1111/j.1574-6976.2007.00072.x. Acesso em: 01 out. 2025.

TEIXEIRA, A. L. Sistemas agrícolas mais sustentáveis. *In*: **Plataforma Visão de futuro do Agro**. [S. l.: s. n.]. Disponível em: <https://www.embrapa.br/visao-defuturo/sustentabilidade/sinal-etendencia/sistemas-agricolas-mais-sustentaveis>. Acesso em: 01 out. 2025.

VACHERON, J.; DESBROSSES, G.; BOUFFAUD, M.-L.; TOURAINE, B.; MOËNNE-LOCCOZ, Y.; MULLER, D.; LEGENDRE, L.; WISNIEWSKI-DYÉ, F.; PRIGENT-COMBARET, C. Plant growth-promoting rhizobacteria and root system functioning. **Frontiers in Plant Science**, v. 4, p. 356, 17 set. 2013. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2013.00356/full>. Acesso em: 02 out. 2025.

VESSEY, J. K. Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. **Plant and Soil**, v. 255, p. 571-586, 2003. Disponível em: 10.1023/A:1026037216893. Acesso em: 02 out. 2025.

WANDER, A. E.; SILVA, O. F. da. **Socioeconomia do feijão**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2025. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/feijao>. Acesso em: 01 out. 2025.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos de modo especial à Izabely Vitória Lucas Ferreira, Especialista em Agropecuária (UNIFESSA), Mestre em Biotecnologia Aplicada à Agropecuária (UFRA) e Doutoranda em Agronomia/Produção Vegetal (UFG), pela orientação dedicada e pela imprescindível contribuição na elaboração do projeto de pesquisa. Sua disponibilidade, expertise e apoio foram fundamentais para a condução e conclusão deste trabalho.

Igualmente, agradecemos à Embrapa Arroz e Feijão, localizada no município de Santo Antônio de Goiás (GO), pela cessão de infraestrutura e pelo suporte técnico concedidos, os quais foram indispensáveis para a execução da presente pesquisa.