



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS – CAMPUS ARARAS
DEPARTAMENTO DE BIOTECNOLOGIA E PRODUÇÃO VEGETAL E
ANIMAL

ERNANI GUIM CAMÕES

EFICIÊNCIA DO MANEJO COM *Rhizobium tropici* E *Methylobacterium*
***symbioticum* NA CULTURA DO FEIJOEIRO COMUM**

Araras – SP

2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS – CAMPUS ARARAS
DEPARTAMENTO DE BIOTECNOLOGIA E PRODUÇÃO VEGETAL E
ANIMAL



ERNANI GUIM CAMÕES

**EFICIÊNCIA DO MANEJO COM *Rhizobium tropici* E *Methylobacterium*
symbioticum NA CULTURA DO FEIJOEIRO COMUM**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
ao curso de graduação em Engenharia
Agrônômica, da Universidade Federal de
São Carlos, campus Araras, como requisito
para obtenção do título de Engenheiro
Agrônomo.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Ferreira da
Silva

Araras – SP

2025

AGRADECIMENTOS

A Deus, que faz da minha vida uma experiência única e privilegiada. Por todas as oportunidades concedidas, pelos caminhos abertos, pelas pessoas colocadas ao meu lado e pela força nos momentos em que seguir em frente exigiu fé, coragem e resiliência. O Senhor é meu pastor, nada me faltará.

À minha mãe, Juliana dos Santos Guim, a quem devo todo o amor deste mundo. Obrigado por ser sinônimo de cuidado, entrega e presença. Por me ensinar, desde cedo, a importância da empatia. Por me proteger, desde sempre, de quaisquer males mundanos. Muito do que sou carrega sua sensibilidade, sua força e sua forma generosa de enxergar a vida. Me faltam palavras e ações para expressar todo o amor que sinto por você, mãe.

À meu pai, Eurico Costa Sousa Camões, meu maior ídolo e exemplo. Obrigado por me ensinar o valor do trabalho, da honestidade, da responsabilidade e da palavra. Sua trajetória sempre foi, para mim, referência de caráter e dedicação. Seus ensinamentos, carregador de amor e sabedoria, guardo no coração para sempre. Menção honrosa à Liberdade = Responsabilidade. Sonho em um dia ser como você, te amo pai.

À minha irmã, Maria Clara Guim Camões, minha melhor amiga. Obrigado por ser companhia, leveza e apoio em todos os momentos. Sua presença torna a vida mais bonita, mais divertida e mais completa. Ter você como irmã é uma das maiores bênçãos que carrego. Estaremos juntos do começo ao fim da vida, te amo Clarinha.

Aos meus amigos de Ribeirão Preto - SP, integrantes de nosso fiel grupo *Mesaboa*, agradeço pela amizade verdadeira, pelas risadas, pelas histórias e pela certeza de que nossas conexões permanecem firmes independentemente da distância, do tempo ou das fases da vida. Vocês fazem parte da minha história antes, durante e certamente depois da graduação.

À República Toca, por me acolher e me formar nos primeiros anos de faculdade, dando-me irmãos para a vida toda. Em especial, agradeço a Arnaldo Ribeiro (Tim), Tiago Casanova (Linguini), Eduardo Bresciani (Mou), Luis Eduardo (Bokão) e Guilherme Guizi (Salame), pela convivência, amizade, companheirismo e por todas as experiências que marcaram profundamente minha vida universitária. A Toca foi casa, escola e família.

Ao Rafael Allegretti, um grande irmão e companheiro de longa data, uma das pessoas mais diferenciadas que já tive a honra de conhecer, ser amigo e sócio. Obrigado pela lealdade, pelas ideias, pelas sinceridades, pelos projetos e pela parceria constante. Sua amizade é um grande benção na minha vida. Menção honrosa à Veia Loka, que também faz parte dessa história, e fez parte da história de muitos outros citados aqui. Tamo junto, Rafa!

Ao Lucas Tardeli (Sono), outro grande irmão que pude conhecer através da Toca e levar para a vida toda. Foi com quem dividi residência por mais tempo ao longo desses anos e, além disso, uma das pessoas com quem mais compartilhei vivências, projetos, viagens, músicas, ideias, debates, e momentos que ficarão guardados para sempre. Você é uma das pessoas mais interessantes que já conheci, Sono. Obrigado por transformar a rotina em amizade e a convivência em memória.

Ao João Henrique Ristow, colega de classe 021 que virou irmão em pouco tempo. Desde paraquedas até estágios em fazendas, você sempre me levou para cima e sempre manteve a régua alta. Obrigado por me inspirar a buscar mais e a encarar a vida com intensidade, ambição e propósito. Conte com minha gratidão e parceria sempre!

Aos meus amigos de classe, Paulo Henrique, Lucas Gabriel, Gabriel Zayas e João Malaguti, agradeço por nunca me deixarem na mão, por estarem presentes quando precisei e por fazerem parte desses rápidos e inesquecíveis cinco anos. A graduação se tornou mais leve e mais divertida porque pude caminhar ao lado de vocês.

Aos meus professores orientadores, Gustavo Ferreira e Juliana Lima, os quais tive a oportunidade de conhecer apenas no final da faculdade, agradeço pelos ensinamentos, pela confiança depositada em mim e pela forma generosa com que contribuíram para minha formação. Mesmo em pouco tempo, deixaram marcas importantes nesta etapa final da graduação, no desenvolvimento deste trabalho e no meu desenvolvimento como profissional.

Ao GEPAGRI e sua memorável equipe, agradeço pela parceria, pelo trabalho em grupo e por tudo que construímos juntos. Tive a honra de ser coordenador em uma fase

de ouro do grupo, marcada por crescimento, união, responsabilidade e entusiasmo. Em especial, agradeço a Gabriel Cagale, Enzo Noventa, Guilherme Falvo, Pedro Augusto, Lorenzo Poloto e João Domingos, por compartilharem comigo esse período tão importante de desenvolvimento profissional e pessoal. SAROOOBAAAA!

À República Lacta, por ser minha segunda casa em Araras - SP, por ter cuidado tão bem de mim no ano de bixo e por manter, ao longo dos anos seguintes, tanto respeito, carinho e consideração. Agradeço por cada acolhimento, cada conversa e cada momento vivido. Levo comigo uma gratidão enorme por tudo que essa casa representou na minha trajetória.

Aos meus amigos, que hoje descansam em paz, Rafael Cavalini (Pokotó) e Bruno Otsu (Esguixu). Os bons sempre vão primeiro para serem os anfitriões lá em cima. Obrigado pelas lindas memórias e por fazer renascer a espiritualidade de tantos alunos em nosso campus.

A todos aqueles com quem pude compartilhar experiências ao longo desses cinco anos, meu sincero obrigado. Foram os melhores anos da minha vida até aqui, não apenas pelas conquistas acadêmicas, mas principalmente pelas pessoas, pelos aprendizados, pelos desafios, pelas amizades e pelas histórias que levarei comigo para sempre.

Por fim, deixo como reflexão aquilo que moldou minhas condutas ao longo desta caminhada: é preciso amar e dar o seu melhor. Amar aquilo que se faz, amar as pessoas que caminham ao nosso lado e entregar, em cada oportunidade, o máximo que se tem. Todas as pessoas citadas nestes agradecimentos carregam, de alguma forma, essa característica. São pessoas que se destacam por onde passam, não apenas pelo que fazem, mas pela maneira como fazem: com intensidade, verdade, generosidade e compromisso.

E isso eu aprendi em casa. Aprendi observando meus pais, as pessoas mais trabalhadoras e amorosas que já conheci. Com eles entendi que não há grandeza sem dedicação e não há conquista sem esforço. Com meus amigos, entendi que não há sentido em vencer sozinho. Dessa forma, encerro esta etapa com gratidão, orgulho e a certeza de que cada passo dado até aqui foi construído com o apoio, o exemplo e o amor de muitas pessoas. A todos vocês, meu mais sincero obrigado!

Resumo

O feijoeiro comum apresenta elevada exigência em nitrogênio e forte dependência de adubação mineral nitrogenada, o que motiva a busca por insumos biológicos capazes de complementar o fornecimento desse nutriente. Objetivou-se avaliar o efeito da inoculação e da coinoculação de *Rhizobium tropici* e *Methylobacterium symbioticum*, aplicadas em diferentes estádios fenológicos do feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris* L.) cv. IAC 2153 Cranberry, sobre o crescimento, a produção de grãos, a eficiência no uso do nitrogênio (EUN) e a viabilidade econômica da cultura. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, em delineamento de blocos casualizados, com sete tratamentos e cinco repetições. Os tratamentos combinaram a inoculação de *R. tropici* na semente com a aplicação foliar de *M. symbioticum* nos estádios V2 e/ou R5. As médias foram comparadas pelo teste de Scott-Knott (5%), procedendo-se ainda à análise de retorno econômico incremental. O número de vagens por planta e de grãos por vagem não foi influenciado pelos tratamentos, de modo que as diferenças de produtividade decorreram essencialmente da massa dos grãos. A aplicação única de *M. symbioticum* no estágio R5, sem coinoculação (T5), proporcionou a maior produtividade (7,757 g planta⁻¹; 113% superior ao controle), a melhor EUN e o maior retorno econômico (margem incremental líquida de R\$ 6.478,98 ha⁻¹; relação benefício/custo de 27,8). A coinoculação com *R. tropici* reduziu a produtividade, indicando antagonismo. Conclui-se que o momento de aplicação foi mais determinante do que o número de aplicações, e que a aplicação foliar de *M. symbioticum* no estágio R5 constitui estratégia promissora para aumentar a produtividade e a eficiência do uso do nitrogênio na cultura.

Palavras-chave: fixação biológica de nitrogênio; bioinsumos; eficiência no uso do nitrogênio; análise de retorno econômico; momento de aplicação.

Abstract

Common bean has a high nitrogen requirement and a strong dependence on mineral nitrogen fertilization, which motivates the search for biological inputs able to complement the supply of this nutrient. This study aimed to evaluate the effect of inoculation and co-inoculation of *Rhizobium tropici* and *Methylobacterium symbioticum*, applied at different phenological stages of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cv. IAC 2153 Cranberry, on growth, grain yield, nitrogen use efficiency (NUE) and the economic viability of the crop. The experiment was carried out under greenhouse conditions, in a randomized complete block design, with seven treatments and five replications. Treatments combined seed inoculation with *R. tropici* and foliar application of *M. symbioticum* at the V2 and/or R5 stages. Means were compared by the Scott-Knott test (5%), and an incremental economic return analysis was also performed. The number of pods per plant and grains per pod was not affected by the treatments, so that yield differences resulted essentially from grain mass. A single application of *M. symbioticum* at the R5 stage, without co-inoculation (T5), provided the highest yield (7.757 g plant⁻¹; 113% higher than the control), the best NUE and the highest economic return (net incremental margin of R\$ 6,478.98 ha⁻¹; benefit/cost ratio of 27.8). Co-inoculation with *R. tropici* reduced yield, indicating antagonism. It is concluded that application timing was more decisive than the number of applications, and that foliar application of *M. symbioticum* at the R5 stage is a promising strategy to increase yield and nitrogen use efficiency in the crop.

Keywords: biological nitrogen fixation; bioinputs; nitrogen use efficiency; economic return analysis; application timing.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	8
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
2.1. A cultura do feijoeiro.....	10
2.2. Exigência em nitrogênio pelo feijoeiro comum	11
2.3. Fixação biológica de nitrogênio e limitações no feijoeiro.....	12
2.4. <i>Rhizobium tropici</i> e sua utilização na cultura do feijoeiro	14
2.5. <i>Methylobacterium symbioticum</i> : caracterização, modo de ação e potencial agrônomo	15
2.6. Coinoculação com <i>R. tropici</i> e <i>M. symbioticum</i> em diferentes estádios fenológicos do feijoeiro	17
3. OBJETIVO	18
3.1. Objetivo geral	18
3.2. Objetivos específicos.....	18
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	19
4.1. Localização.....	19
4.2. Delineamento experimental e tratamentos	20
4.3. Material vegetal	21
4.4. Implantação e condução do experimento	22
4.5. Desenvolvimento Vegetal e Produção de Grãos	23
4.6. Eficiência no uso do nitrogênio	24
4.7. Análise de Retorno Econômico	24
4.8. Análise estatística	26
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
5.1. Desenvolvimento vegetal e Rendimento de Grãos.....	26
5.3 Análise econômica incremental.....	32
6. CONCLUSÃO.....	37
REFERÊNCIAS	38

1. INTRODUÇÃO

O crescimento contínuo da população mundial, aliado ao aumento do poder aquisitivo em países emergentes, tem intensificado a demanda por alimentos, especialmente aqueles ricos em proteínas de origem vegetal. Nesse contexto, o feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris* L.) destaca-se como uma das culturas mais importantes para a segurança alimentar global. No Brasil, o feijão possui grande relevância socioeconômica e cultural, constituindo, juntamente com o arroz, a base da alimentação da população (Nadeem et al., 2021). Além disso, os grãos apresentam elevado valor nutricional, com teor proteico que pode variar entre 17 e 40%, além de serem fonte de carboidratos complexos, fibras, vitaminas e minerais essenciais, como ferro, fósforo, magnésio e zinco (Lima et al., 2014; Zargar et al., 2017).

O Brasil está entre os principais produtores mundiais de feijão, sendo responsável por aproximadamente 11% da produção global (FAOSTAT, 2023). Na safra 2025/26, estima-se o cultivo de cerca de 2,6 milhões de hectares, com produção próxima a 3,0 milhões de toneladas de grãos e produtividade média de 1.141 kg ha⁻¹ (CONAB, 2026a). Apesar da ampla adoção da cultura em diferentes regiões do país, a produtividade média nacional ainda é considerada inferior ao potencial produtivo da cultura, sendo limitada por diversos fatores, entre os quais se destaca o manejo da nutrição mineral, especialmente do nitrogênio (Wutke et al., 2022).

Entre os nutrientes essenciais ao feijoeiro, o nitrogênio (N) é o mais exigido ao longo do ciclo da cultura, desempenhando papel central no metabolismo vegetal. Esse nutriente participa da síntese de aminoácidos, proteínas, ácidos nucleicos (DNA e RNA) e clorofila, sendo indispensável para o crescimento vegetativo, desenvolvimento reprodutivo e formação de grãos (Luo et al., 2020; Maia et al., 2017). Dessa forma, a disponibilidade adequada de N ao longo do ciclo da planta é determinante para o acúmulo de biomassa e para a produtividade final da cultura (Silva et al., 2020; Sousa et al., 2022).

Em condições tropicais, como as predominantes no Brasil, fatores como altas temperaturas e elevada umidade favorecem a mineralização da matéria orgânica e intensificam perdas de nitrogênio no sistema solo-planta por processos como volatilização, lixiviação e desnitrificação (Martins et al., 2017; Puga et al., 2020). Como consequência, a adubação nitrogenada mineral tem sido amplamente utilizada para suprir as demandas da cultura. Entretanto, essa prática eleva significativamente os custos de produção e pode gerar impactos ambientais negativos, uma vez que uma parcela

significativa do fertilizante aplicado pode ser perdida para o ambiente (Figueiredo et al., 2016).

Além dos aspectos econômicos, o uso intensivo de fertilizantes nitrogenados está associado ao aumento das emissões de gases de efeito estufa e à contaminação de recursos hídricos, configurando-se como um dos principais desafios para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas modernos (Good e Beatty, 2011; Shibata et al., 2017). Nesse contexto, torna-se fundamental o desenvolvimento de estratégias capazes de aumentar a eficiência do uso do nitrogênio, reduzindo a dependência de fertilizantes minerais sem comprometer a produtividade das culturas.

A fixação biológica de nitrogênio (FBN) representa uma alternativa sustentável para o fornecimento desse nutriente às plantas, especialmente em leguminosas, por meio da simbiose com bactérias diazotróficas do gênero *Rhizobium*. Estima-se que a FBN seja responsável por uma parcela significativa do nitrogênio incorporado aos sistemas agrícolas, podendo suprir grande parte da demanda do nutriente em determinadas culturas (Herridge et al., 2008). No feijoeiro comum, a associação simbiótica com *Rhizobium tropici* tem sido amplamente estudada e apresenta potencial para reduzir parcialmente a necessidade de adubação nitrogenada mineral (Sousa et al., 2022).

Entretanto, diferentemente do observado em culturas como a soja (*Glycine max* L.), a eficiência da FBN no feijoeiro pode apresentar grande variabilidade, em função de fatores como genótipo da planta, condições edafoclimáticas, manejo do solo e competição com populações nativas de rizóbios (Herridge et al., 2008; Rao e Balachandar, 2017). Dessa forma, a inoculação com *Rhizobium* é frequentemente utilizada como estratégia complementar ao uso de fertilizantes nitrogenados, e não necessariamente como substituição total dessa prática (Wutke et al., 2022).

Diante dessas limitações, tem aumentado o interesse pelo uso de microrganismos promotores de crescimento vegetal capazes de atuar de forma complementar à fixação biológica de nitrogênio. Entre esses microrganismos, destaca-se *Methylobacterium symbioticum*, bactéria metilotrófica, que pode colonizar tecidos vegetais após aplicação foliar e estabelecer interação associativa com a planta hospedeira (Pascual et al., 2020).

Nesse cenário, a utilização conjunta de diferentes microrganismos pode representar uma estratégia promissora para aumentar a eficiência do uso do nitrogênio nas culturas agrícolas. A coinoculação de bactérias com diferentes modos de ação, como *R. tropici*, responsável pela fixação biológica de nitrogênio em nódulos radiculares, e *M.*

symbioticum, capaz de atuar de forma associativa na planta, pode resultar em efeitos complementares no sistema solo-planta-microrganismo.

Apesar do avanço dessas tecnologias, ainda são limitadas as informações disponíveis na literatura sobre os efeitos da coinoculação desses microrganismos na cultura do feijoeiro, especialmente considerando diferentes momentos de aplicação ao longo do ciclo da cultura. A compreensão dessas interações pode contribuir para o desenvolvimento de estratégias de manejo mais eficientes e sustentáveis, capazes de aumentar a produtividade agrícola e reduzir a dependência de fertilizantes nitrogenados.

Nesse contexto, a hipótese deste trabalho é que a coinoculação de *R. tropici* e *M. symbioticum*, aplicada em diferentes estádios fenológicos do feijoeiro, possa promover melhorias no desempenho agrônomo da cultura quando comparada à inoculação isolada com *R. tropici*, contribuindo para maior eficiência no uso do nitrogênio. Assim, o presente estudo teve como objetivo avaliar os efeitos da inoculação e coinoculação desses microrganismos sobre o desenvolvimento e a produtividade do feijoeiro, utilizando a cultivar IAC 2153 Cranberry.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1.A cultura do feijoeiro

O feijoeiro comum (*P. vulgaris* L.) pertence à família Fabaceae, subfamília Papilionoideae, apresenta grande diversidade genética e morfológica entre cultivares (Nadeem et al., 2021). A espécie é classificada como uma planta herbácea anual, de crescimento determinado ou indeterminado, dependendo do hábito de crescimento da cultivar. O sistema radicular é do tipo pivotante, com raízes laterais que se desenvolvem nas camadas superficiais do solo, podendo estabelecer associações simbióticas com bactérias do gênero *Rhizobium*, responsáveis pela fixação biológica de nitrogênio (EMBRAPA, 2018).

A parte aérea da planta é composta por caule herbáceo, folhas trifolioladas e flores papilionáceas, típicas de leguminosas, com pétalas diferenciadas em estandarte, asas e quilha, dispostas em inflorescências axilares racemosas. Após a fecundação, ocorre a formação das vagens, que constituem o principal produto econômico da cultura.

O ciclo fenológico do feijoeiro é relativamente curto, variando normalmente entre 75 e 100 dias, dependendo da cultivar e das condições ambientais. O desenvolvimento da cultura é dividido em duas fases principais: fase vegetativa e fase reprodutiva. A fase

vegetativa compreende os estádios V1-V4, caracterizada pela emergência, desenvolvimento das folhas primárias e trifólios, enquanto a fase reprodutiva inicia-se no estágio R5, com o florescimento, seguido pela formação de vagens, enchimento de grãos e maturação fisiológica (Wutke et al., 2022).

Do ponto de vista nutricional, o feijoeiro apresenta elevada exigência em nutrientes minerais, especialmente nitrogênio, fósforo e potássio. Entre esses nutrientes, o nitrogênio destaca-se por ser absorvido em maiores quantidades e por desempenhar papel fundamental na formação de compostos estruturais e metabólicos essenciais ao desenvolvimento da planta e à formação de proteínas nos grãos (Maia et al., 2017; Sousa et al., 2022). Em função do ciclo relativamente curto da cultura e da elevada demanda nutricional, é fundamental que os nutrientes estejam disponíveis no solo em quantidades adequadas nos períodos de maior exigência fisiológica.

Nesse contexto, compreender a dinâmica de absorção e distribuição de nutrientes ao longo do ciclo do feijoeiro torna-se essencial para o adequado manejo da fertilidade do solo e da nutrição mineral da cultura, especialmente em relação ao nitrogênio, nutriente diretamente relacionado ao crescimento das plantas e à produtividade de grãos.

2.2.Exigência em nitrogênio pelo feijoeiro comum

O feijoeiro comum apresenta elevada exigência de nitrogênio (N) ao longo do seu ciclo de desenvolvimento, sendo este o nutriente absorvido em maior quantidade pela cultura e diretamente relacionado ao crescimento vegetativo, à formação de estruturas reprodutivas e ao acúmulo de proteínas nos grãos (Maia et al., 2017; Sousa et al., 2022). O nitrogênio é componente estrutural de aminoácidos, proteínas, ácidos nucleicos e da molécula de clorofila, exercendo papel fundamental na fotossíntese, no metabolismo energético e no desenvolvimento das plantas (Luo et al., 2020).

A absorção e a distribuição de N no feijoeiro variam conforme o estágio fenológico da cultura. Durante os estádios vegetativos iniciais, o nutriente é direcionado principalmente para o crescimento da parte aérea e do sistema radicular, contribuindo para o estabelecimento da área foliar e para o desenvolvimento da arquitetura da planta (Silva et al., 2020; Wutke et al., 2022).

Com o início da fase reprodutiva, que ocorre no estágio R5, a demanda por nitrogênio se intensifica em função da formação das estruturas reprodutivas e do enchimento de grãos. Estudos indicam que aproximadamente 60% do nitrogênio mineral total acumulado pelo feijoeiro durante o ciclo é absorvido entre o florescimento (R6) e

meados do enchimento de grãos (R7-R8), evidenciando a elevada exigência nutricional da cultura nesse período (Hungria, 1994). Nesse estágio, a taxa de absorção do nutriente pode atingir valores próximos de 3,5 kg ha⁻¹ por dia (Soratto et al., 2005).

Paralelamente à absorção de nitrogênio do solo, ocorre intensa redistribuição interna desse nutriente na planta. Parte do N acumulado nas folhas e em outros tecidos vegetativos é remobilizada e translocada para as vagens e grãos em desenvolvimento, processo fundamental para o enchimento das sementes e para a formação de compostos nitrogenados de reserva, como algumas proteínas (Krul, 2019; Zargar et al., 2017). Estima-se que aproximadamente 50% do nitrogênio total absorvido pela planta seja exportado para os grãos na colheita, evidenciando novamente a importância desse nutriente para a produtividade e qualidade nutricional da cultura (Oliveira et al., 1996; Soratto et al., 2005).

Em ambientes tropicais, a dinâmica do nitrogênio no sistema solo-planta é fortemente influenciada por fatores climáticos e pelas características do solo, que podem intensificar processos de perda do nutriente, como volatilização de amônia, lixiviação de nitrato e desnitrificação, reduzindo a eficiência do uso de fertilizantes nitrogenados (Martins et al., 2017; Puga et al., 2020). Dessa forma, mesmo em sistemas com adubação mineral, podem ocorrer períodos de limitação de nitrogênio ao longo do ciclo da cultura, especialmente em fases de elevada demanda fisiológica.

Diante dessa elevada exigência de nitrogênio pelo feijoeiro e das limitações associadas ao suprimento desse nutriente no solo, estratégias que aumentem a disponibilidade de N para as plantas tornam-se fundamentais para a sustentabilidade e produtividade dos sistemas de cultivo, destacando-se entre elas a fixação biológica de nitrogênio.

2.3.Fixação biológica de nitrogênio e limitações no feijoeiro

A fixação biológica de nitrogênio (FBN) é um processo microbiológico no qual microrganismos diazotróficos convertem o nitrogênio atmosférico (N₂) em amônia (NH₃), forma assimilável pelas plantas. Em leguminosas, esse processo ocorre principalmente por meio da simbiose entre as plantas e bactérias do gênero *Rhizobium*, que colonizam o sistema radicular e formam estruturas especializadas denominadas nódulos radiculares (Hungria, 1994; Herridge et al., 2008).

O processo de infecção inicia-se quando bactérias presentes no solo reconhecem compostos exsudados pelas raízes das plantas hospedeiras, especialmente flavonoides,

que estimulam a expressão de genes responsáveis pela nodulação. Após o reconhecimento molecular entre planta e bactéria, ocorre a infecção dos pelos radiculares e o desenvolvimento de estruturas denominadas fios de infecção, através dos quais as bactérias penetram nos tecidos radiculares. Como resultado dessa interação, são formados os nódulos radiculares, nos quais as bactérias se diferenciam em bacteroides e passam a realizar a fixação do nitrogênio atmosférico por meio da enzima nitrogenase (Hungria, 1994)

Nos nódulos, o nitrogênio molecular é reduzido a amônia, que posteriormente é assimilada pela planta e incorporada em aminoácidos e outros compostos nitrogenados essenciais ao metabolismo vegetal. Em contrapartida, a planta fornece às bactérias compostos carbonados provenientes da fotossíntese, estabelecendo uma relação simbiótica mutuamente benéfica (Herridge et al., 2008).

Apesar da importância desse processo, a eficiência da FBN no feijoeiro comum é frequentemente inferior à observada em outras leguminosas, como a soja. A contribuição da FBN para o suprimento de nitrogênio na cultura do feijoeiro pode ser limitada e altamente variável, dependendo de fatores genéticos, ambientais e de manejo (Rao e Balachandar, 2017). Entre os principais fatores que interferem na eficiência da FBN, destacam-se as condições edafoclimáticas, a disponibilidade de nitrogênio mineral no solo e a competitividade entre estirpes inoculadas e populações nativas de rizóbios presentes no ambiente (Mendoza-Suárez et al., 2020).

A disponibilidade elevada de nitrogênio mineral no solo, proveniente principalmente da adubação nitrogenada, pode reduzir a nodulação e a atividade da FBN. Além disso, a aplicação contínua de fertilizantes nitrogenados pode contribuir para a acidificação da rizosfera, alterando as condições químicas do solo e reduzindo o potencial de sobrevivência e eficiência das estirpes de *Rhizobium* responsáveis pela fixação biológica de nitrogênio. Essas alterações podem comprometer a formação de nódulos e a atividade da enzima nitrogenase, diminuindo a contribuição da FBN para o suprimento de nitrogênio da cultura (Hungria, 1994; Herridge et al., 2008).

Em função dessas limitações, a FBN raramente supre integralmente a demanda de nitrogênio do feijoeiro em sistemas de produção de alta produtividade. Dessa forma, estratégias de manejo que visem aumentar a eficiência da FBN e complementar o suprimento desse nutriente ao longo do ciclo da cultura têm sido amplamente estudadas, incluindo o uso de microrganismos promotores de crescimento vegetal e diferentes formas de inoculação.

2.4. *Rhizobium tropici* e sua utilização na cultura do feijoeiro

As bactérias do gênero *Rhizobium* pertencem ao grupo dos microrganismos diazotróficos capazes de estabelecer relações simbióticas com plantas da família Fabaceae, promovendo a fixação biológica de nitrogênio atmosférico. Entre essas bactérias, destaca-se *R. tropici*, espécie amplamente utilizada na inoculação do feijoeiro comum devido à sua elevada capacidade de nodulação e adaptação a diferentes condições edafoclimáticas (Hungria, 1994; Wutke et al., 2022).

R. tropici é uma bactéria gram-negativa, de vida livre no solo, que apresenta a capacidade de colonizar raízes de leguminosas e estabelecer simbiose com a planta hospedeira. Durante esse processo, a bactéria infecta os pelos radiculares e induz a formação de nódulos nas raízes, estruturas especializadas nas quais ocorre a fixação biológica de nitrogênio. No interior desses nódulos, as bactérias se diferenciam em bacteroides e passam a reduzir o nitrogênio atmosférico (N_2) a amônia (NH_3) por meio da enzima nitrogenase, disponibilizando esse nutriente para a planta. Em contrapartida, a planta fornece compostos carbonados resultantes da fotossíntese, necessários para o metabolismo bacteriano e manutenção da atividade simbiótica (Herridge et al., 2008).

Além da FBN, bactérias do gênero *Rhizobium* podem atuar como promotoras do crescimento vegetal, contribuindo para o desenvolvimento das plantas por meio de diferentes mecanismos fisiológicos, como produção de fitormônios, aumento da absorção de nutrientes e estímulo ao crescimento radicular. Esses efeitos podem resultar em maior vigor inicial das plantas e maior eficiência no uso de nutrientes (Figueiredo et al., 2016).

Diversos estudos têm demonstrado os benefícios da inoculação com *Rhizobium* na cultura do feijoeiro. Em experimentos conduzidos em solos tropicais, a inoculação com estirpes eficientes pode aumentar significativamente o número e a massa de nódulos radiculares, além de favorecer o crescimento das plantas e a produtividade de grãos (Figueiredo et al., 2016). Resultados semelhantes foram observados por Sousa et al. (2022), em que verificaram incrementos na nodulação e rendimento do feijoeiro por meio da inoculação com *Rhizobium*, especialmente em ambientes com baixa disponibilidade de nitrogênio mineral.

Apesar dos benefícios potenciais da inoculação com *Rhizobium* no feijoeiro, a efetividade da fixação biológica de nitrogênio pode ser reduzida por uma série de fatores relacionados ao ambiente e ao manejo. A presença de nitrogênio mineral no solo, especialmente em elevadas concentrações, tende a inibir a nodulação e a atividade

nitrogenase dos nódulos, uma vez que a planta passa a utilizar preferencialmente o N prontamente disponível, reduzindo o investimento energético na simbiose (Hungria; Vargas, 2000). Além disso, condições de déficit hídrico, excesso de umidade, temperaturas extremas, pH desfavorável e deficiência de micronutrientes como molibdênio e cobalto podem comprometer tanto a sobrevivência das bactérias no solo quanto a formação e a funcionalidade dos nódulos (Hungria et al., 2003; Sousa et al., 2022).

Nesse contexto, o uso de microrganismos promotores de crescimento vegetal associados a diferentes estratégias de manejo tem sido estudado como alternativa para complementar o suprimento de nitrogênio e aumentar a eficiência do uso desse nutriente na cultura.

2.5. *Methylobacterium symbioticum*: caracterização, modo de ação e potencial agronômico

M. symbioticum é uma bactéria pertencente ao grupo das metilotróficas facultativas, microrganismos capazes de utilizar compostos de um carbono, como metanol, liberados pelo metabolismo vegetal. Essa espécie foi descrita por Pascual et al. (2020) como uma nova espécie bacteriana isolada a partir de esporos de *Glomus iranicum* var. *tenuihypharum*, sendo caracterizada por análises morfológicas, bioquímicas e filogenéticas. A descrição taxonômica dessa bactéria fornece a base científica para seu uso posterior em formulações comerciais voltadas à agricultura.

Diferentemente do *R. tropici*, que estabelece simbiose radicular com formação de nódulos, *M. symbioticum* atua de forma associativa, colonizando a superfície foliar e podendo também ocupar tecidos internos da planta após a aplicação. Estudos com bactérias do gênero *Methylobacterium* indicam que essas populações podem penetrar pela folha, inclusive via aberturas estomáticas, estabelecendo comunidades epifíticas e endofíticas na filosfera e contribuindo para processos fisiológicos da planta hospedeira (Bolla et al., 2025).

Assim como outros microrganismos diazotróficos, *M. symbioticum* apresenta potencial de realizar FBN por meio da enzima nitrogenase, que converte o N₂ atmosférico em amônia. No caso dessa bactéria, entretanto, a fixação não ocorre em nódulos radiculares, mas em associação com tecidos vegetais colonizados, especialmente folhas. Dessa forma, trata-se de uma FBN de natureza associativa, distinta da simbiose clássica observada em leguminosas noduladas. Segundo Bolla et al. (2025), parte das espécies de

Methylobacterium presentes na filosfera apresenta capacidade de fixar nitrogênio, podendo contribuir para o suprimento desse nutriente à planta em determinadas condições. No entanto, os mecanismos exatos de transferência e a magnitude desse suprimento ainda dependem do ambiente, da espécie vegetal e do manejo adotado.

Além do potencial diazotrófico, *M. symbioticum* pode atuar como bactéria promotora de crescimento vegetal por outros mecanismos fisiológicos. A atividade de ACC desaminase foi documentada na estirpe SB23 dessa espécie (Bolla et al., 2025; Valente et al., 2024). Essa enzima reduz os níveis de ACC, precursor imediato do etileno, diminuindo a síntese desse hormônio na planta (Glick, 2014). Como consequência, pode ocorrer atraso da senescência foliar, manutenção da clorofila e prolongamento da atividade fotossintética, fatores que podem favorecer o crescimento vegetal e melhorar a eficiência de uso do nitrogênio. Esses efeitos são particularmente relevantes em fases de maior exigência fisiológica da cultura, nas quais a manutenção da atividade fotossintética pode contribuir para o enchimento de grãos.

Do ponto de vista agronômico, os resultados obtidos com *M. symbioticum* têm sido promissores, mas variáveis entre culturas e condições de cultivo. Vera et al. (2024), trabalhando com milho e morango, observaram que a aplicação do inoculante biológico promoveu respostas compatíveis com efeito bioestimulante e complementar ao manejo nitrogenado, incluindo aumento da capacidade fotossintética e indicativos de redução da necessidade de N mineral em determinadas condições. Por outro lado, Arrobas, Correia e Rodrigues (2024), avaliando a aplicação foliar de *M. symbioticum* em alface, verificaram que o inoculante foi pouco efetivo em aumentar a fixação de N e a produção de matéria seca, evidenciando que a resposta à bactéria não é universal e depende fortemente da espécie vegetal e do ambiente.

Essa variabilidade de resposta mostra que o potencial agronômico de *M. symbioticum* deve ser interpretado com cautela. Embora existam evidências de colonização foliar, contribuição para a eficiência de uso do nitrogênio e efeitos fisiológicos positivos em algumas culturas, ainda são necessários estudos específicos para compreender seu comportamento em diferentes espécies e estádios fenológicos. No caso do feijoeiro, essa discussão é especialmente relevante, uma vez que a bactéria pode atuar de forma complementar à FBN radicular promovida por *R. tropici*, abrindo perspectiva para estratégias combinadas de inoculação ao longo do ciclo da cultura.

2.6. Coinoculação com *R. tropici* e *M. symbioticum* em diferentes estádios fenológicos do feijoeiro

O uso de microrganismos promotores de crescimento vegetal tem sido amplamente estudado como estratégia para aumentar a eficiência do uso de nutrientes e reduzir a dependência de fertilizantes minerais na agricultura. Nesse contexto, a coinoculação de diferentes microrganismos com mecanismos complementares de ação tem sido proposta como alternativa promissora para melhorar o desempenho das culturas agrícolas (Sousa et al., 2022).

No caso do feijoeiro, a inoculação com bactérias do gênero *Rhizobium*, especialmente *R. tropici*, tem como principal objetivo estimular a formação de nódulos radiculares e aumentar a FBN via sistema radicular. Entretanto, como discutido anteriormente, a eficiência da FBN nessa cultura pode ser limitada por fatores ambientais, pelo ciclo relativamente curto da planta e pela competição com populações nativas de rizóbios presentes no solo (Herridge et al., 2008; Wutke et al., 2022).

Nesse cenário, o uso de outros microrganismos promotores de crescimento vegetal, como *M. symbioticum*, tem sido estudado como estratégia complementar ao manejo da fixação biológica de nitrogênio. Diferentemente do *Rhizobium*, que atua principalmente na rizosfera e nos nódulos radiculares, *M. symbioticum* pode colonizar tecidos aéreos da planta após aplicação foliar, estabelecendo interação associativa com o hospedeiro e podendo contribuir para processos fisiológicos relacionados à nutrição nitrogenada e ao crescimento vegetal (Pascual et al., 2020; Bolla et al., 2025).

A coinoculação desses microrganismos pode resultar em efeitos complementares no sistema solo-planta-microrganismo, uma vez que cada bactéria atua em diferentes nichos ecológicos da planta. Enquanto *R. tropici* promove a FBN em nódulos radiculares, *M. symbioticum* pode atuar na filosfera e em tecidos internos da planta, contribuindo para processos fisiológicos relacionados à eficiência de uso do nitrogênio e à manutenção da atividade fotossintética (Bolla et al., 2025; Vera et al., 2024).

Outro aspecto relevante no uso de microrganismos promotores de crescimento vegetal, refere-se ao momento de aplicação ao longo do ciclo da cultura. A demanda por nitrogênio no feijoeiro varia conforme o estágio fenológico, sendo relativamente menor nos estádios iniciais de desenvolvimento e aumentando significativamente durante a fase reprodutiva, especialmente no período de enchimento de grãos (Soratto et al., 2005).

Nesse contexto, a aplicação de microrganismos em diferentes estádios fenológicos pode representar uma abordagem promissora para complementar o suprimento de nitrogênio em momentos de maior exigência fisiológica da planta. Enquanto a inoculação via semente ou sulco de semeadura com *R. tropici* busca favorecer a nodulação e a FBN nos estádios iniciais de desenvolvimento, aplicações posteriores de microrganismos associativos, como *M. symbioticum*, podem contribuir para processos fisiológicos relacionados ao crescimento vegetal e ao metabolismo do nitrogênio em fases mais avançadas do ciclo.

Assim, a integração de diferentes microrganismos promotores de crescimento vegetal e o manejo do momento de aplicação ao longo do ciclo da cultura representam estratégias promissoras para aumentar a eficiência do uso de nitrogênio no feijoeiro. Entretanto, a magnitude desses efeitos ainda depende das condições ambientais, do sistema de cultivo e da interação entre planta e microrganismo, reforçando a importância de estudos experimentais que avaliem essas estratégias em diferentes contextos agronômicos.

3. OBJETIVO

3.1. Objetivo geral

Avaliar o efeito da inoculação e coinoculação de *R. tropici* e *M. symbioticum*, aplicadas em diferentes estádios fenológicos do feijoeiro comum, sobre a produção de grãos e a viabilidade econômica da cultura.

3.2. Objetivos específicos

a) Determinar o efeito das diferentes estratégias de inoculação e coinoculação sobre os componentes de produção, a produtividade de grãos e a massa seca da parte aérea do feijoeiro, considerando o momento de aplicação dos microrganismos ao longo do ciclo da cultura.

b) Estimar a viabilidade econômica incremental da adoção de *Methylobacterium symbioticum* como estratégia isolada e/ou complementar à inoculação com *Rhizobium tropici*, com base nos dados experimentais de produtividade extrapolados para escala comercial.

c) Comparar a eficiência no uso do nitrogênio (EUN) dos tratamentos de inoculação e coinoculação avaliados.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Localização

O experimento foi conduzido em casa de vegetação na Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) campus Araras - São Paulo. O clima da região, segundo classificação de Köppen é do tipo Cwa, que significa clima mesotérmico com inverno seco, com precipitação média anual de 1.384 mm e temperatura média anual de 21,6° C. Os dados de temperatura e umidade no interior da casa de vegetação estão apresentados na Figura 1.

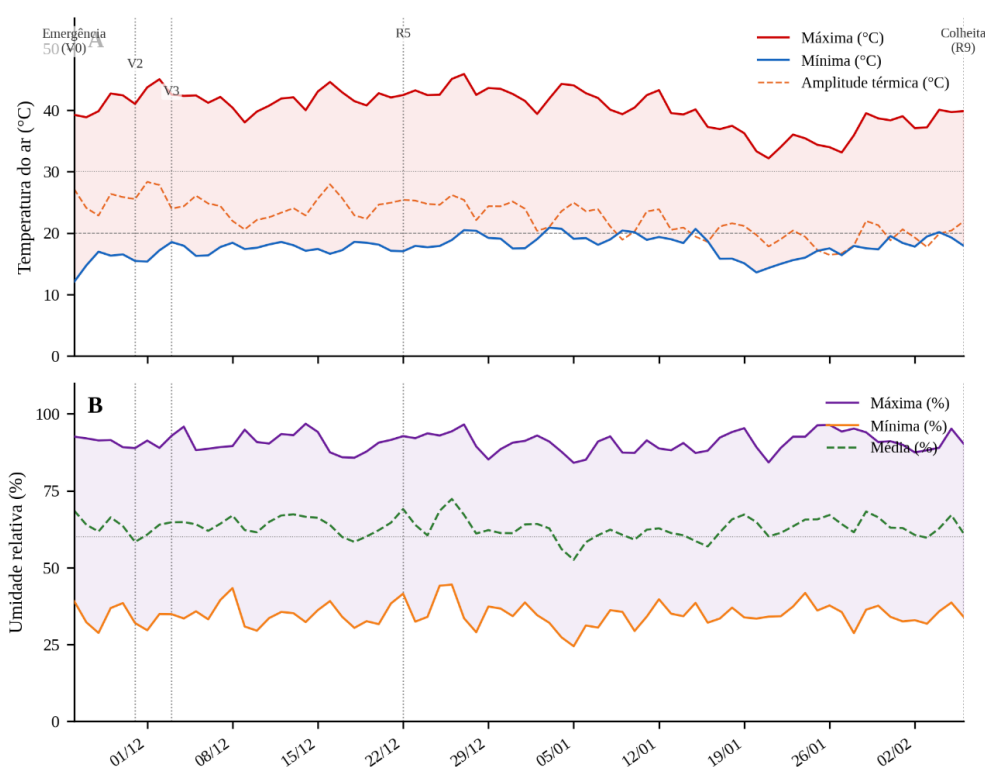


Figura 1. Temperatura do ar (A - máxima, mínima e amplitude térmica) e umidade relativa (B - máxima mínima e média) dentro da casa de vegetação durante a condução do experimento na cultura do feijão.

O experimento foi conduzido em Latossolo Vermelho distrófico, de textura muito argilosa, com as características químicas e granulométricas apresentadas na Tabela 1. Foi coletado na Quadra 14 da Universidade Federal de São Carlos, Campus Araras - SP.

Tabela 1. Características químicas e granulométricas do solo.

Atributos	Valor	Atributos	Valor
pH (CaCl ₂)	5,2	V (%)	66
P _{res} (mg dm ⁻³)	12,3	B (mg dm ⁻³)	0,16
S (mg dm ⁻³)	21,9	Cu (mg dm ⁻³)	3,7
K (mmol _c dm ⁻³)	3,1	Fe (mg dm ⁻³)	18,6
Ca (mmol _c dm ⁻³)	41,1	Mn (mg dm ⁻³)	103,6
Mg (mmol _c dm ⁻³)	30,6	Zn (mg dm ⁻³)	1,2
Al (mmol _c dm ⁻³)	0,0	Areia (g dm ⁻³)	219
H+Al (mmol _c dm ⁻³)	38,8	Silte (g dm ⁻³)	151
M.O. (g kg ⁻¹)	32,7	Argila (g dm ⁻³)	630

4.2.Delineamento experimental e tratamentos

O experimento foi conduzido em delineamento de blocos casualizados, composto por sete tratamentos e cinco repetições, totalizando 35 unidades experimentais. Cada unidade experimental foi constituída por um vaso com capacidade de 12 L, contendo três plantas de feijoeiro. Para garantir a presença de três plantas saudáveis, foi semeado nove sementes de feijão por vaso, que logo após emergência, seis foram desbastadas. Os tratamentos foram definidos em função da inoculação com *R. tropici* e *M. symbioticum* em diferentes estádios fenológicos da cultura, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2. Descrição dos tratamentos em função da inoculação com *Rhizobium tropici* na semeadura e coinoculação com *Methylobacterium symbioticum* em diferentes fases fenológicas do feijoeiro.

Tratamento	Inoculação via semente	Fase fenológica da coinoculação via foliar com <i>Methylobacterium symbioticum</i>
T1 - Controle	Ausente	Ausente
T2	<i>Rhizobium tropici</i>	Ausente
T3	Ausente	V2
T4	<i>Rhizobium tropici</i>	V2
T5	Ausente	R5
T6	Ausente	V2 e R5
T7	<i>Rhizobium tropici</i>	V2 e R5

V2: folhas primárias completamente expandidas; R5: aparecimento dos primeiros botões florais.

A inoculação com *R. tropici* foi realizada via semente, utilizando as cepas 4077 e 4088 na concentração de 3×10^9 unidades formadoras de colônia (UFC) por mL do produto, na dosagem de 2,5 mL do produto por 1 kg de semente de feijão, conforme recomendação do fabricante. Para isso, foi utilizado sacos plásticos intransponíveis e identificados, para garantir homogeneização do produto e umidades similares (Figura 2A).

A coinoculação com *M. symbioticum* foi realizada via pulverização foliar, com a cepa SB23, na concentração de 3×10^7 UFC por grama do produto comercial (Figura 2B). As aplicações foram realizadas nos estádios fenológicos V2 (abertura e crescimento das folhas primárias, 30 de novembro) e R5 (formação dos botões florais, 22 de dezembro), na dosagem de 333 g ha^{-1} do produto comercial, em volume de calda de 200 L ha^{-1} , conforme recomendação do fabricante. Vale ressaltar que a recomendação comercial foi determinada apenas para as culturas da soja, milho e batata. Para adaptação às condições experimentais em vasos, utilizou-se a proporção de 2,52 g do produto diluídos em 1,5 L de calda, assegurando proporcionalidade com a dose de campo.



Figura 2. Inoculação via semente com *Rhizobium tropici* (A) e coinoculação com *Methylobacterium symbioticum* (B) em feijão comum, cultivar IAC 2153 Cranberry.

4.3. Material vegetal

Foi utilizada a cultivar de feijoeiro comum IAC 2153 Cranberry, pertencente ao grupo comercial cranberry e desenvolvida pelo Programa de Melhoramento Genético do Feijoeiro do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC). A cultivar é voltada predominantemente para o mercado de exportação europeu, apresenta alta produtividade, grãos pesados e calibre correspondente a aproximadamente 170 grãos em 100 g.

Apresenta resistência à antracnose, resistência moderada a *Fusarium oxysporum* e ao cretamento bacteriano, e suscetibilidade moderada a *Fusarium solani* (Carbonell et al., 2021; Chiorato et al., 2023). Além disso, é uma cultivar com pouca pesquisa no Brasil. Na Figura 3 está exposto o padrão de coloração da vagem.



Figura 3. Padrão de coloração do feijão comum IAC 2153 Cranberry.

4.4. Implantação e condução do experimento

O experimento foi conduzido em vasos com capacidade de 12 L contendo solo previamente coletado, homogeneizado e adubado conforme as recomendações para a cultura do feijoeiro (Wutke et al., 2022). A adubação de semeadura foi realizada com base nas recomendações do Boletim 100 para expectativa de produtividade entre 3 e 4 t ha⁻¹, equivalente a 20, 60 e 80 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅ e K₂O, sendo aplicados por vaso 0,24 g de ureia (N), 2,90 g de superfosfato simples (P₂O₅) e 0,37 g de cloreto de potássio (K₂O).

A semeadura foi realizada em 19 de novembro de 2024. As sementes dos tratamentos T2, T4 e T7 foram inoculadas com *R. tropici* 1h antes da semeadura. Foi realizada a aplicação de molibdênio (10–15%), cobalto (1–1,5%) e níquel (0,1–0,5%) no sulco de semeadura, na dosagem de 50 mL ha⁻¹ do produto comercial. Para aplicação do produto no vaso, foi preparada uma solução estoque com 1 mL de produto comercial diluído em 999 mL de água e, a partir desta solução foi realizada uma nova diluição, contendo 25 mL da solução estoque em 975 mL de água, da qual foram aplicados 10 mL por vaso.

A emergência das plântulas ocorreu seis dias após a semeadura (DAS, em 25 de novembro de 2024). O estágio fenológico V2 foi observado em 30 de novembro (11 DAS), V3 em 03 de dezembro (14 DAS) e R5 em 22 de dezembro (33 DAS).

A adubação nitrogenada de cobertura foi realizada em aplicação única e manual no estágio V3, com fornecimento de 50 kg ha⁻¹ de N na forma de ureia granulada (0,60 g vaso⁻¹). Essa dose corresponde a aproximadamente 50% da adubação nitrogenada de cobertura recomendada para a cultura (Wutke et al., 2022). A adoção intencional de metade da dose, sem a realização da segunda aplicação de cobertura usualmente recomendada, teve como objetivo criar uma condição de restrição parcial de nitrogênio na fase reprodutiva. Dessa forma, buscou-se avaliar se a inoculação com bactérias fixadoras de nitrogênio, em especial a aplicação foliar de *M. symbioticum* nos estádios reprodutivos, seria capaz de suprir a demanda da planta e sustentar o enchimento de grãos até o final do ciclo, compensando a menor disponibilidade de nitrogênio mineral.

Durante a condução do experimento, foram realizadas irrigações periódicas para manutenção da umidade do solo dos vasos próxima à capacidade de campo e manejo manual para controle de plantas daninhas. O manejo de pragas foi realizado com aplicação de tiometoxan (150 g ha⁻¹ i.a., volume de calda de 200 L ha⁻¹), via drench; para isso foram dissolvidos 2,3 g do produto comercial (Actara® 750 WG) em 18 L de calda, aplicados uniformemente em todas as plantas do experimento, em uma única aplicação (20 de janeiro de 2026).

4.5. Desenvolvimento Vegetal e Produção de Grãos

Ao final do ciclo, no estágio R9, foram avaliadas as seguintes variáveis de crescimento e produção, sendo todas as coletas realizadas individualmente por planta dentro de cada vaso:

- Número de vagens por planta: contagem direta de todas as vagens de cada planta individualmente, realizada no momento da colheita.
- Número de grãos por vagem: contagem direta dos grãos de cada vagem, com resultado expresso como média por planta.
- Produção de grãos (g planta⁻¹): avaliada por meio da colheita dos grãos de cada unidade experimental, sendo os valores corrigidos para 13% de umidade.
- Massa seca da parte aérea (g planta⁻¹): a parte aérea de cada planta foi cortada rente ao solo, acondicionada em sacos de papel identificados e submetida

à secagem em estufa de circulação forçada de ar a 65 °C até atingir massa constante.

4.6. Eficiência no uso do nitrogênio

A eficiência no uso do nitrogênio (EUN) foi determinada como a quantidade de nitrogênio necessária para produzir uma unidade de grãos, expressa em kg de N por kg de grãos. Para isso, as doses de nitrogênio aplicadas em semeadura e cobertura foram divididas pela produtividade extrapolada para kg ha⁻¹, conforme equação 1:

$$\text{Eficiência no uso do nitrogênio (EUN)} = \frac{\text{Dose de nitrogênio aplicada (kg ha}^{-1}\text{)}}{\text{Produtividade de grãos (kg ha}^{-1}\text{)}} \quad (1)$$

4.7. Análise de Retorno Econômico

Com base nos resultados de produtividade de grãos por planta obtidos no experimento, foram realizadas extrapolações para escala de 1 hectare, considerando estande de 250.000 plantas ha⁻¹. A análise consistiu no cálculo da receita bruta de cada tratamento e na comparação com os custos incrementais dos insumos biológicos efetivamente utilizados, em relação ao tratamento controle (T1), adotado como referência com custo zero de insumos biológicos. Os demais custos de produção, incluindo adubação mineral de semeadura e cobertura, sementes, produto Enraize Max (Co, Mo, Ni; R\$ 30,00 ha⁻¹), operações de preparo e colheita, foram considerados constantes e iguais entre todos os tratamentos, não compondo o diferencial incremental da análise.

Os custos incrementais analisados foram: inoculante de *R. tropici* em produto líquido, estimado em R\$ 15,00 ha⁻¹ (Biobean, Nodular Satis); e *M. symbioticum* (Utrisha™ N, Corteva Agriscience), na dose de 333 g ha⁻¹ por aplicação a R\$ 500,00 kg⁻¹, totalizando R\$ 166,50 ha⁻¹ por aplicação em produto, acrescidos de R\$ 75,00 ha⁻¹ por operação de pulverização tratorizada isolada, com base em valores de referência CONAB (2026b) para operações mecanizadas em culturas anuais no estado de São Paulo. Os tratamentos com duas aplicações de *M. symbioticum* (T6 e T7) tiveram os custos de produto e aplicação correspondentemente duplicados. O preço de referência adotado foi a cotação do feijão cranberry comercializado pela empresa Arbaza, de R\$ 388,00 sc⁻¹ de 60 kg, em 22 de junho de 2026 (Arbaza, 2026 - informação verbal). Os custos de produção e o incremento na receita bruta de cada tratamento estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Valores estimados para 1 hectare de produtividade grãos, custos com bioinsumos e incremento na receita bruta (comparado com tratamento sem bioinsumo - T1 controle) de feijoeiro cultivado comum cv. IAC 2153 Cranberry submetido a diferentes estratégias de inoculação.

Tratamento	Produção (g planta ⁻¹)	Produção (kg ha ⁻¹)	Produção (sc ha ⁻¹)	Custo insumos biológicos (R\$ ha ⁻¹)	Incremento na receita bruta vs T1 (R\$ ha ⁻¹)
T1 – Controle	3,600	900,0	15,00	0,00	0,00
T2 – <i>R. tropici</i>	4,151	1.037,8	17,30	15,00	890,78
T3 – <i>M. symbioticum</i> V2	5,226	1.306,5	21,77	241,50	2.628,70
T4 – <i>R. tropici</i> + <i>M. symbioticum</i> V2	3,690	922,5	15,38	256,50	145,50
T5 – <i>M. symbioticum</i> R5	7,757	1.939,2	32,32	241,50	6.720,48
T6 – <i>M. symbioticum</i> V2 e R5	5,211	1.302,8	21,71	483,00	2.604,45
T7 – <i>R. tropici</i> + <i>M. symbioticum</i> V2 e R5	4,747	1.186,8	19,78	498,00	1.854,32

Preço de referência: R\$ 388,00 sc⁻¹ (60 kg), feijão cranberry, cotação Arbaza, 22/06/2026. Estande: 250.000 plantas ha⁻¹. Custo por aplicação de *M. symbioticum*: R\$ 166,50 (produto) + R\$ 75,00 (pulverização tratorizada, ref. CONAB/SP, 2026) = R\$ 241,50 ha⁻¹ por aplicação. Inoculante de *R. tropici*: R\$ 15,00 ha⁻¹.

Com base nos dados apresentados na Tabela 3 foram calculados a margem incremental líquida (R\$ ha⁻¹) e a relação benefício custo, conforme equações 2 e 3, respectivamente.

$$MIL \text{ (R\$ ha}^{-1}\text{)} = IRB_{T1} - CIB \quad (2)$$

$$RBC = \frac{IRB_{T1}}{CIB} \quad (3)$$

Onde MIL significa margem incremental líquida; IRB_{T1} corresponde ao incremento na receita bruta em comparação ao tratamento controle (T1), expresso em R\$ ha⁻¹; CIB expressa o custo com insumos biológicos em R\$ ha⁻¹; RBC significa relação benefício/custo.

4.8. Análise estatística

Os dados foram testados quanto à normalidade pelo teste de Kolmogorov-Smirnov e homocedasticidade por meio do teste de Hartley. Os dados foram submetidos à análise de variância, com níveis de significância de 5% de probabilidade de erro e as médias comparadas pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade de erro.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Desenvolvimento vegetal e Rendimento de Grãos

O número de vagens por planta e o número de grãos por vagem não foram influenciados pelo manejo dos bioinsumos, resultando em valores médios de 4,90 vagem por planta e 2,52 grãos por vagem (Figura 4A e 4B).

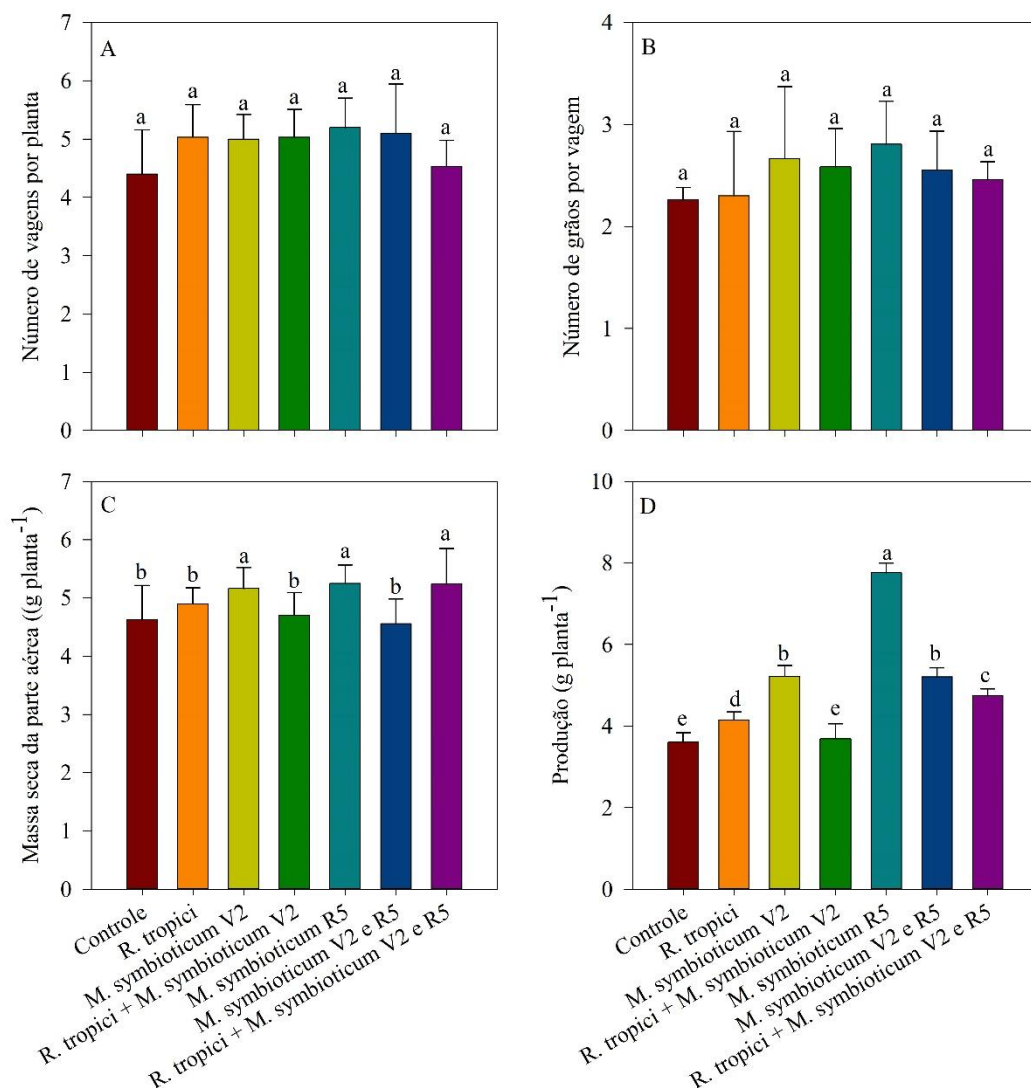


Figura 4. Número de vagens por planta (A), número de grãos por vagem (B), massa seca da parte aérea (C) e produção de grãos (D) do feijoeiro comum cv. IAC 2153 Cranberry submetido a diferentes estratégias de inoculação. Letras diferentes indicam diferença significativa pelo teste de Scott-Knott ($p \leq 0,05$). Barras de erro representam o desvio-padrão da média.

Para a aplicação foliar de *Methylobacterium symbioticum* em V2, a ausência de resposta pode estar associada à reduzida área foliar disponível nesse estágio, o que limita a superfície de contato para deposição, sobrevivência e colonização da bactéria na parte aérea da planta. Como *Methylobacterium* atua como microrganismo associado à filosfera, sua eficiência depende da colonização dos tecidos foliares e das condições favoráveis à sua permanência e atividade metabólica na superfície das folhas (TORRES VERA et al., 2024; RODRIGUES et al., 2024).

Por outro lado, quando a aplicação de *M. symbioticum* foi realizada em R5, o estágio já se encontrava muito próximo do florescimento e da formação inicial das vagens. No feijoeiro-comum, o número de vagens por planta é definido principalmente durante o florescimento e o pegamento inicial das vagens, enquanto o número de grãos por vagem está associado à fecundação dos óvulos e ao estabelecimento inicial das sementes (PEKŞEN, 2007; SOLTANI et al., 2019). Considerando que a colonização e o estabelecimento funcional da bactéria após a aplicação foliar não ocorrem de forma imediata, o efeito do bioinsumo provavelmente ocorreu de forma mais tardia, coincidindo principalmente com o período de enchimento dos grãos, e não com a definição do número de vagens ou do número de grãos por vagem.

Em relação à inoculação com *Rhizobium tropici*, a ausência de diferenças significativas também pode ser atribuída à conhecida variabilidade de resposta da fixação biológica de nitrogênio no feijoeiro. A eficiência da inoculação depende de diversos fatores, como estirpe utilizada, nodulação efetiva, população nativa de rizóbios no solo, pH, disponibilidade de nutrientes, umidade, temperatura, manejo nitrogenado e condições edafoclimáticas durante o ciclo da cultura (HUNGRIA; CAMPO; MENDES, 2003; SOUSA et al., 2022). Dessa forma, nas condições deste experimento, a inoculação com *R. tropici* não foi suficiente para alterar significativamente o número de vagens por planta e o número de grãos por vagem, indicando que as diferenças observadas na produção de grãos decorreram mais provavelmente de efeitos posteriores sobre o enchimento e a massa dos grãos do que do aumento no número de estruturas reprodutivas.

Em relação a massa seca da parte aérea por planta, houve diferenças entre os tratamentos analisados (Figura 4C). Os tratamentos que foram inoculados com *M. symbioticum* em V2 (T3), R5 (T5) e coinoculados com *R. tropici* e *M. symbioticum* em V2 e R5 (T7) tiveram incremento de 11,30% na massa seca de planta em comparação aos demais tratamentos (Figura 4C). Nota-se que os tratamentos que receberam aplicação de *M. symbioticum* apenas na fase vegetativa (V2), reprodutiva (R5) ou com aplicação em ambos os estádios fenológicos combinados com *R. tropici* na semeadura responderam melhor em termos de acúmulo de biomassa. Esse incremento pode estar associado à atividade de ACC desaminase, documentada na estirpe de *M. symbioticum* utilizada como inoculante (SB23) por Bolla et al. (2025) e por Valente et al. (2024). Essa enzima cliva o ácido 1-aminociclopropano-1-carboxílico (ACC), precursor imediato do etileno, em α -cetobutirato e amônia, reduzindo a produção desse hormônio na planta hospedeira (Glick, 2014). Como o etileno é um dos principais sinalizadores da senescência foliar, a redução

dos seus níveis tende a retardar a senescência das folhas e a prolongar a atividade fotossintética da parte aérea, efeito de permanência foliar verde (Valente et al., 2024; Bolla et al., 2025). A manutenção de folhas funcionais por mais tempo favorece o acúmulo de fotoassimilados e, conseqüentemente, o ganho de massa seca, especialmente nos tratamentos em que a bactéria foi aplicada em estádios reprodutivos, quando a demanda metabólica da planta é mais intensa.

Contudo, a resposta não foi consistente: T4 e T6, apesar de também terem recebido *M. symbioticum*, não diferiram do controle (Figura 4C). Uma hipótese para a ausência de ganho em T4 é a sobreposição temporal entre a colonização radicular por *R. tropici* e a aplicação foliar de *M. symbioticum*, ambas concentradas no início da fase vegetativa, antes do pico de demanda metabólica da planta (PEKŞEN, 2007). Enquanto T6, não resultou em incremento adicional de biomassa em relação à aplicação única, sugerindo que o segundo evento de colonização não trouxe benefício sob suprimento mineral de N adequado. Esses resultados são coerentes com Arrobas, Correia e Rodrigues (2024), que, trabalhando com alface, observaram efeito limitado de *M. symbioticum* sobre a massa seca quando o N estava adequadamente suprido. O detalhamento do mecanismo dessa interação exigiria avaliações adicionais, como a dinâmica de colonização bacteriana ao longo do ciclo, o que ultrapassa o escopo deste estudo.

Já em relação a produção de grãos, a inoculação de *M. symbioticum* em R5 resultou em incrementos na ordem de 49% em relação aos tratamentos com aplicação de *M. symbioticum* apenas em V2 (T3) e em duas aplicações, em V2 e R5 (T6); 63% comparado à associação de *R. tropici* com *M. symbioticum* aplicados em V2 e R5; 87% em relação à inoculação com *R. tropici*; e de 113% quando comparado ao tratamento controle e com *R. tropici* associado a *M. symbioticum* em V2 (Figura 4D). Cabe ressaltar que as maiores produções de grãos foram obtidas nos tratamentos com aplicação apenas de *M. symbioticum* (T3, T5 e T6). Esse resultado revela um efeito antagônico da coinoculação sobre a produtividade: sempre que o *R. tropici* foi associado a uma mesma estratégia de aplicação de *M. symbioticum*, a produção de grãos foi reduzida. A adição de *R. tropici* ao tratamento com aplicação em V2 reduziu a produtividade de 5,226 g planta⁻¹ (T3) para 3,690 g planta⁻¹ (T4), uma queda de 29%; e, no tratamento com duas aplicações, reduziu de 5,211 g planta⁻¹ (T6) para 4,747 g planta⁻¹ (T7), queda de 9%. Em ambos os pares, a presença do *R. tropici* deslocou o tratamento para um grupo estatístico inferior, indicando que a coinoculação não foi aditiva e, ao contrário, comprometeu o desempenho produtivo (Figura 4D).

O padrão de resposta observado é biologicamente coerente com a dinâmica de demanda por nitrogênio no feijoeiro. O estágio R5 corresponde ao início da fase reprodutiva, período em que a taxa de absorção de N pode atingir até 3,5 kg ha⁻¹ dia⁻¹ e aproximadamente 60% do nitrogênio total absorvido no ciclo é acumulado entre o florescimento e o enchimento pleno dos grãos (Soratto et al., 2005). No presente experimento, a adubação nitrogenada de cobertura foi realizada em dose única no estágio V3, não havendo segunda aplicação em R5. Nesse cenário, a aplicação foliar de *M. symbioticum* em R5 representou a única intervenção nesse período crítico, e os tratamentos que a receberam (T5, T6 e T7) apresentaram produtividades superiores ao controle e ao tratamento com *R. tropici* isolado.

Esses resultados reforçam o padrão observado ao longo de todo o experimento: os tratamentos com resposta positiva em produtividade e massa seca (T5, T7) compartilham a aplicação de *M. symbioticum* em R5, justamente o estágio em que se inicia a fase reprodutiva e a maior demanda por fotoassimilados para a formação de vagens e grãos. Em milho cultivado com doses reduzidas de N mineral, Bolla et al. (2025) observaram incrementos de produtividade atribuídos à maior capacidade fotossintética durante o enchimento de grãos, padrão consistente com o observado em T5 no presente estudo, no qual a maior produtividade absoluta (7,757 g planta⁻¹) coincidiu exatamente com a única aplicação de *M. symbioticum* realizada no início da fase reprodutiva, e não na fase vegetativa (T3) ou em duas aplicações, nos estádios V2 e R5 (T6).

Nesse sentido, cabe destacar a aplicação de *M. symbioticum* apenas em V2 (T3), em que se nota que não apenas a aplicação em R5, mas qualquer intervenção com essa bactéria foi capaz de diferenciar os tratamentos do controle, do grupo que inclui *R. tropici* isolado e da coinoculação restrita ao estágio vegetativo. Uma possível explicação para o efeito de T3 é que a colonização estabelecida em V2 tenha persistido até o período reprodutivo, exercendo efeitos fisiológicos ao longo do ciclo. Após a aplicação foliar, *M. symbioticum* penetra pelos estômatos e coloniza endofiticamente os tecidos vegetais em aproximadamente sete dias, podendo manter populações endófitas ativas por períodos prolongados (Bolla et al., 2025). Entretanto, a confirmação dessa hipótese requer análises de população bacteriana ao longo do ciclo, o que ultrapassa o escopo do presente estudo.

A inoculação isolada com *R. tropici* (T2) não diferiu do controle (T1), resultado alinhado com a elevada variabilidade de resposta histórica documentada para essa estratégia em feijoeiro sob condições de solo tropical com adubação nitrogenada (Sousa et al., 2022; Wutke et al., 2022). Esses achados reforçam a percepção consolidada na

literatura de que a FBN via nodulação em feijoeiro raramente expressa seu potencial máximo em sistemas com suprimento mineral de N, seja por inibição da nodulação pelo nitrogênio mineral, seja por competição com populações nativas de rizóbios no solo (Herridge et al., 2008; Mendoza-Suárez et al., 2020).

A coinoculação de *R. tropici* com *M. symbioticum* restrita ao estágio V2 (T4) não diferiu do controle (Figura 4D). A ausência de efeito aditivo em T4 pode ser explicada pela sobreposição temporal entre a colonização radicular por *R. tropici* e a aplicação foliar de *M. symbioticum*, ambas concentradas na fase vegetativa inicial. Nesse período, a planta ainda não atingiu a demanda metabólica máxima por fotoassimilados, de modo que os possíveis efeitos de ambos os microrganismos sobre a fisiologia foliar não se traduziram em ganho de produtividade. Além disso, pode ser que o *R. tropici* não tenha desempenhado ainda seu máximo potencial de nodulação, tendo em vista que a planta estava em estágio inicial de desenvolvimento. Soma-se a isso o custo de manter duas associações microbianas simultâneas, discutido adiante.

Contudo, T7 (aplicação de *M. symbioticum* em R5 e V2, combinada à inoculação de *R. tropici*) teve produção de grãos superior ao T4 e à inoculação isolada com *R. tropici* (T2), o que pode indicar que apenas a inoculação com *R. tropici* não é suficiente para manter o fornecimento de N ao longo do ciclo do feijoeiro. Entretanto, a aplicação de *M. symbioticum* em R5 contribui para fixação de N e, conseqüente, aumento na produção de grãos. E, no caso de T7, a aplicação em V2 não resultou em ganhos produtivos, sendo o diferencial em produção alavancado pela inoculação em R5.

Em conjunto, o comportamento antagônico da coinoculação é coerente com a observação de que o efeito de *M. symbioticum* tende a ser limitado quando o nitrogênio já se encontra adequadamente suprido (Arrobas, Correia e Rodrigues, 2024): com a adubação mineral de N e a nodulação por *R. tropici*, o nitrogênio deixa de ser o principal fator limitante. Uma hipótese complementar é a de que a manutenção simultânea das duas associações microbianas imponha à planta um custo energético não compensado pelo aporte adicional de nitrogênio, o que ajudaria a explicar a redução de produtividade observada na coinoculação. A confirmação dessa hipótese requer avaliações de alocação de carbono e da dinâmica de nodulação ao longo do ciclo.

5.3 Análise econômica incremental

A análise de retorno econômico, realizada com base nas produtividades experimentais extrapoladas para escala comercial (250.000 plantas ha⁻¹), evidenciou diferenças expressivas entre os tratamentos quanto à relação entre custo dos insumos biológicos e receita gerada (Tabela 3). O preço de referência adotado foi a cotação de mercado do feijão cranberry, de R\$ 388,00 sc⁻¹ de 60 kg, obtida junto à empresa Arbaza em 22 de junho de 2026.

Cabe ressaltar que a inoculação com *R. tropici* na semente (T2) é prática consolidada e amplamente difundida na cultura do feijoeiro no Brasil (Hungria et al., 2003; Wutke et al., 2022), mas que gera aumento na receita líquida incremental de R\$875,78 ha⁻¹ em comparação à adubação nitrogenada mineral (T1) (Figura 5A). Além disso, nota-se que o tratamento com inoculação de *M. symbioticum* em R5 (T5) resultou em incremento de R\$ 6478,98 ha⁻¹, em relação ao tratamento controle (T1) (Figura 5A).

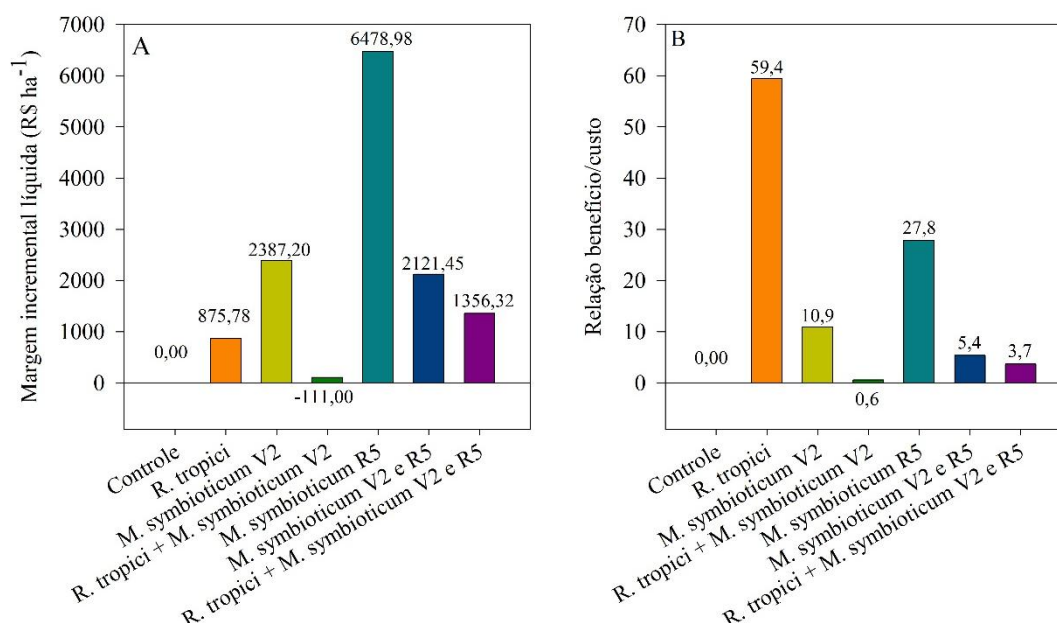


Figura 5. Margem incremental líquida (A) e relação custo/benefício (B) da aplicação de diferentes estratégias de inoculação e coinoculação de *Rhizobium tropici* e *Methylobacterium symbioticum* no feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris* L.) cv. IAC 2153 Cranberry, em relação ao tratamento controle.

Cabe destaque, a comparação dos tratamentos com inoculação com *R. tropici* (T2) com a inoculação de *M. symbioticum* em R5 (T5), uma vez que o T2 resultou em maior RBC (Figura 5B), enquanto o T5 teve maior MIL (Figura 5A). O ganho de produtividade de T5 sobre T2 foi de 15,02 sc ha⁻¹, gerando margem líquida adicional de R\$ 5.603,20

ha⁻¹, com relação benefício/custo (RBC) de 25,7 sobre esse investimento marginal. Embora T2 tenha apresentado a maior RBC do experimento (59,4), reflexo do baixo custo unitário do inoculante de *R. tropici* (R\$ 15,00 ha⁻¹), a margem incremental líquida absoluta de T5 foi 7,4 vezes superior (Figura 5A). Essa distinção é relevante do ponto de vista da tomada de decisão agrônoma; enquanto a RBC exprime a eficiência proporcional do investimento, a margem líquida absoluta representa o ganho financeiro efetivo por área.

Dessa forma, a interpretação conjunta da RBC e da MIL permite diferenciar estratégias de manejo conforme a capacidade de investimento do produtor. Em situações de menor disponibilidade de capital ou maior aversão ao risco, a inoculação isolada com *R. tropici* via semente representa uma alternativa economicamente eficiente, pois demanda baixo investimento inicial e apresentou elevada relação benefício/custo. Entretanto, quando há possibilidade de maior aporte financeiro por hectare, a aplicação de *M. symbioticum* em R5 mostrou-se mais vantajosa em termos de retorno absoluto, pois proporcionou maior margem incremental líquida. Assim, enquanto o T2 se destaca pela maior eficiência proporcional do capital investido, o T5 apresenta maior geração de receita líquida por área, sendo a alternativa de maior impacto econômico quando o objetivo é maximizar o lucro por hectare.

O único tratamento com margem incremental líquida negativa foi T4 (coinoculação de *R. tropici* com *M. symbioticum* em V2), com R\$ -111,00 ha⁻¹ em relação ao controle, indicando que a produtividade obtida não foi suficiente para compensar o custo dos insumos (R\$ 256,50 ha⁻¹). Esse resultado é consistente com o desempenho agrônomo de T4, uma vez que houve menor produção (Figura 4D), e reforça que a coinoculação restrita ao estágio vegetativo não representa estratégia economicamente viável nas condições avaliadas. O contraste com T5, mesmo com o custo de *M. symbioticum* (R\$ 241,50 ha⁻¹), porém sem inoculante de *R. tropici*, e margem líquida de R\$ 6.478,98 ha⁻¹, demonstra que o momento de aplicação de *M. symbioticum* é o fator determinante da viabilidade econômica da tecnologia.

Os tratamentos com duas aplicações de *M. symbioticum* (T6 e T7) apresentaram margens positivas de R\$ 2.121,45 ha⁻¹ e R\$ 1.356,32 ha⁻¹, respectivamente, com RBC de 5,4 e 3,7, inferiores ao de T5 (27,8). A comparação entre T5 e T6 evidencia comportamento compatível com a Lei dos Incrementos Decrescentes, segundo a qual o aumento da dose ou da frequência de aplicação de um insumo nem sempre resulta em ganhos proporcionais de produtividade e retorno econômico. Nesse caso, T6 recebeu uma

aplicação adicional de *M. symbioticum* em V2, ao custo adicional de R\$ 241,50 ha⁻¹, sem incremento proporcional de produtividade ou receita, o que reduziu a eficiência econômica do tratamento em relação a T5. Esse comportamento é coerente com Li, Van Gerrewey e Geelen (2022), que observaram, em meta-análise com estudos de campo, que a resposta produtiva aos bioestimulantes varia conforme dose, frequência, método de aplicação, cultura e condições ambientais, indicando que a eficiência agrônômica desses produtos depende de um ponto adequado de uso, acima do qual os incrementos adicionais tendem a ser limitados.

Deve-se ressaltar que os resultados provêm de experimento conduzido em condições controladas de casa de vegetação, e que os valores extrapolados para campo podem diferir em função de variações edafoclimáticas, sanidade da lavoura e manejo fitossanitário. No entanto, a consistência entre o desempenho agrônômico e o retorno econômico de T5, aliada à magnitude da margem incremental observada, indica que a aplicação de *M. symbioticum* no estágio R5 representa estratégia de baixo custo e elevado potencial de retorno financeiro na cultura do feijoeiro.

5.4 Eficiência no uso do nitrogênio

A maior eficiência no uso do nitrogênio (EUN) foi verificado no tratamento com inoculação de *M. symbioticum* em R5 (T5), resultando na necessidade de 36,2 g de N para produção de 1 kg de grãos de feijão (Figura 6).

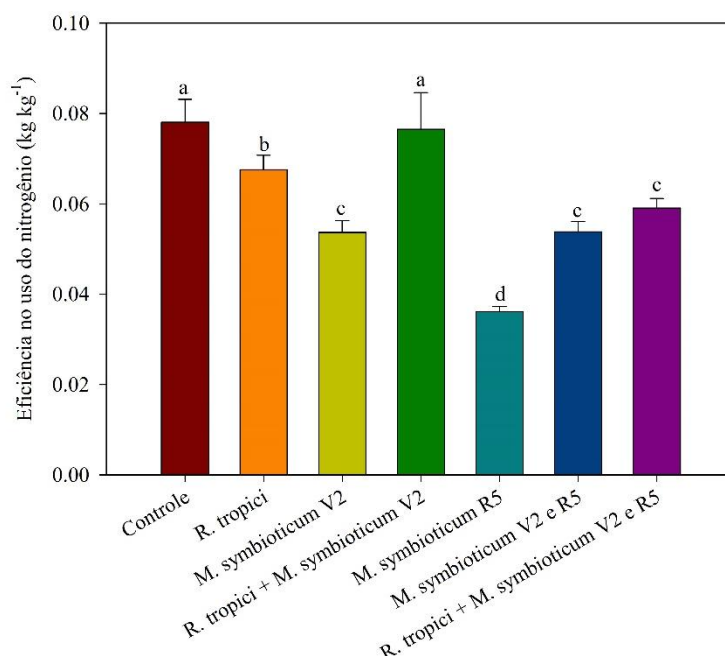


Figura 6. Eficiência no uso do nitrogênio pelo feijoeiro comum cv. IAC 2153 Cranberry submetido a diferentes estratégias de inoculação e coinoculação de *Rhizobium tropici* e *Methylobacterium symbioticum*. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo método de Scott-Knott ($p \leq 0,05$). Barras de erro representam o erro padrão da média.

Ao comparar a eficiência do tratamento com inoculação de *M. symbioticum* em R5 (T5) com os demais manejos, nota-se que a ausência de aplicação de bioinsumos (T1) ou a associação de *R. tropici* com *M. symbioticum* em V2 do feijoeiro (T4) resultou na necessidade de 113,26% a mais de N para a produção da mesma quantidade de grãos. Para os tratamentos com inoculação de *M. symbioticum* em V2 (T3), *M. symbioticum* em V2 e R5 (T6) e a associação de *R. tropici* com *M. symbioticum* em V2 e R5 (T7), a necessidade de N foi 53,31% maior, enquanto para a inoculação isolada com *R. tropici* (T2), demandou-se 86,74% a mais de N.

É importante esclarecer o papel de *M. symbioticum* mesmo com a adubação mineral nitrogenada já presente no sistema. A bactéria realiza fixação biológica de nitrogênio via foliar, convertendo N₂ atmosférico em amônio diretamente nos tecidos foliares (Pascual et al., 2020; Vera et al., 2024). Esse aporte adicional de N reduz a

necessidade de a planta absorver e converter todo o nitrogênio via sistema radicular, diminuindo o gasto energético associado à via do nitrato redutase (Vera et al., 2024). A energia metabólica economizada nesse processo pode ser redirecionada para o crescimento vegetativo e, posteriormente, para o enchimento de grãos. Adicionalmente, a atividade de ACC desaminase da bactéria retarda a senescência foliar e prolonga a atividade fotossintética, contribuindo para que o nitrogênio disponível, seja ele mineral ou fixado biologicamente, seja convertido com maior eficiência em massa de grãos durante o período reprodutivo (Bolla et al., 2025; Valente et al., 2024). A combinação desses dois mecanismos, fornecimento adicional de N e maior eficiência fisiológica de conversão, explica por que T5 apresentou simultaneamente a maior produção (Figura 4D) e a menor EUN (Figura 5).

O controle (T1) e o T4 apresentaram os maiores valores de EUN (0,0780 e 0,0764 kg de N por kg de grãos, respectivamente), ou seja, a menor eficiência no uso do nitrogênio. Como todos os tratamentos receberam a mesma quantidade de N mineral, essa menor eficiência decorre diretamente da menor produtividade de grãos. Do ponto de vista agrônomo, isso representa, de fato, uso menos eficiente do nitrogênio, pois foi necessário um maior aporte de N por quilograma de grão produzido. No caso específico do T4, a ausência de ganho está associada ao fato de a coinoculação ter se restringido ao estágio vegetativo (V2) e, sem a aplicação de *M. symbioticum* em R5, que foi a intervenção determinante para o incremento produtivo neste estudo, o tratamento comportou-se de forma semelhante ao controle quanto à conversão do nitrogênio em grãos. Esse resultado reforça que a coinoculação restrita ao estágio vegetativo não resultou em ganhos produtivos nas condições avaliadas.

Os resultados obtidos abrem caminho para investigações complementares que aprofundem a compreensão do comportamento de *M. symbioticum* na cultura do feijoeiro. Como o presente estudo foi conduzido em casa de vegetação, torna-se necessária a validação das respostas em condições de campo, em diferentes safras, regiões produtoras e sistemas de manejo, a fim de confirmar a magnitude dos ganhos de produtividade e de eficiência no uso do nitrogênio observados. Recomenda-se, ainda, a realização de estudos que quantifiquem diretamente a contribuição da bactéria para o balanço de nitrogênio da planta, por meio de técnicas como a diluição isotópica de ^{15}N e a determinação do nitrogênio total acumulado, o que permitiria distinguir o aporte proveniente da fixação biológica daquele decorrente do aproveitamento do nitrogênio já disponível no sistema. A avaliação da dinâmica de colonização da bactéria ao longo do ciclo, associada a

diferentes estádios e número de aplicações, também contribuiria para esclarecer os mecanismos envolvidos na resposta observada, sobretudo o antagonismo verificado na coinoculação com *R. tropici*. Por fim, investigações que considerem diferentes cultivares, doses de nitrogênio mineral e faixas de preço do feijão cranberry ampliariam a base necessária para consolidar recomendações técnicas e econômicas seguras ao produtor.

6. CONCLUSÃO

A inoculação com *Methylobacterium symbioticum* no estágio de formação dos botões florais (R5) aumenta a produtividade de grãos do feijoeiro cv. Cranberry, a eficiência no uso do nitrogênio e o retorno financeiro incremental. Nas condições avaliadas neste estudo, a inoculação nos estádios iniciais de desenvolvimento (V2) ou a coinoculação com *Rhizobium tropici* (via semente) não se mostraram estratégias eficientes de manejo para a cultura.

Em situações de baixa capacidade de investimento por hectare, a inoculação com *R. tropici* (via semente) assegura maior relação benefício/custo; contudo, havendo condições de ampliar o investimento por área, a aplicação de *M. symbioticum* em R5 resulta em maior receita líquida.

DECLARAÇÃO SOBRE O USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL GENERATIVA

Foram utilizadas ferramentas de inteligência artificial generativa (IA), especificamente o modelo Claude (Anthropic), com o objetivo de auxiliar na redação, na organização e na revisão do texto científico. Todo o conteúdo gerado com o apoio da IA foi cuidadosamente revisado e validado pelo autor, que assume total responsabilidade pela precisão, originalidade e integridade das informações apresentadas. Nenhuma decisão analítica, interpretação de dados ou conclusão científica foi realizada exclusivamente por ferramentas de IA.

REFERÊNCIAS

- ARBAZA. Exportação. 2026. Disponível em: <https://arbaza.co/br/exportacao/>. Acesso em: 22/06/2026.
- ARROBAS, M.; CORREIA, C. M.; RODRIGUES, M. Â. *Methylobacterium symbioticum* applied as a foliar inoculant was little effective in enhancing nitrogen fixation and lettuce dry matter yield. Sustainability, Basel, v. 16, n. 11, 4512, 2024. DOI: 10.3390/su16114512.
- BOLLA, P. K.; PANOZZO, A.; MINOZZI, E.; VALENTE, F.; POTESIO, S.; VISIOLI, G.; MARTINEZ-SAÑUDO, I.; VAMERALI, T. Effects of foliar-sprayed bio-fertilizer with N-fixing *Methylobacterium symbioticum* on morpho-physiological traits of maize under varying N fertilization rates. Frontiers in Plant Science, Lausanne, v. 16, artigo 1661290, 2025. DOI: 10.3389/fpls.2025.1661290.
- CARBONELL, S. A. M.; GONÇALVES, G. de M. C.; PAULINO, J. F. C.; ROVARIS, S. R. S.; ALMEIDA, C. P.; GONÇALVES, J. G. R.; FREITAS, R. S.; CHIORATO, A. F. IAC 2153 and IAC 2156: cranberry and dark red kidney common bean cultivars for new markets. Crop Breeding and Applied Biotechnology, Londrina, v. 21, n. 4, e39542145, 2021. DOI: 10.1590/1984-70332021v21n4c56.
- CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira de grãos: safra 2025/26. Brasília, DF: CONAB, 2026a.
- EMBRAPA ARROZ E FEIJÃO. Conhecendo a fenologia do feijoeiro e seus aspectos fitotécnicos. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 59 p.
- FAOSTAT – Food and Agriculture Organization of The United Nations. Crops. Rome: FAO, 2023. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>. Acesso em: 16/04/2026.
- FIGUEIREDO, M. A.; OLIVEIRA, D. P.; SOARES, B. L.; MORAIS, A. R.; MOREIRA, F. M. S.; ANDRADE, M. J. B. Nitrogen and molybdenum fertilization and inoculation of common bean with *Rhizobium* spp. in two oxisols. Acta Scientiarum. Agronomy, Maringá, v. 38, n. 1, p. 85-92, 2016. DOI: 10.4025/actasciagron.v38i1.26661.
- GOOD, A. G.; BEATTY, P. H. Fertilizing nature: a tragedy of excess in the commons. PLoS Biology, San Francisco, v. 9, n. 8, e1001124, 2011. DOI: 10.1371/journal.pbio.1001124.

- HERRIDGE, D. F.; PEOPLES, M. B.; BODDEY, R. M. Global inputs of biological nitrogen fixation in agricultural systems. *Plant and Soil*, Dordrecht, v. 311, n. 1-2, p. 1-18, 2008. DOI: 10.1007/s11104-008-9668-3.
- HUNGRIA, M. Metabolismo do carbono e do nitrogênio nos nódulos. In: HUNGRIA, Mariangela; ARAÚJO, Ricardo Silva (ed.). *Manual de métodos empregados em estudos de microbiologia agrícola*. Brasília, DF: EMBRAPA, 1994. p. 249-283.
- HUNGRIA, M.; CAMPO, R. J.; MENDES, I. C.. Benefits of inoculation of the common bean (*Phaseolus vulgaris*) crop with efficient and competitive *Rhizobium tropici* strains. *Biology and Fertility of Soils*, Heidelberg, v. 39, p. 88-93, 2003. DOI: 10.1007/s00374-003-0682-6.
- HUNGRIA, M.; VARGAS, M. A. T. Environmental factors affecting N₂ fixation in grain legumes in the tropics, with an emphasis on Brazil. *Field Crops Research*, Amsterdam, v. 65, n. 2-3, p. 151-164, 2000. DOI: 10.1016/S0378-4290(99)00084-2.
- KRUL, E. S. Calculation of nitrogen-to-protein conversion factors: a review with a focus on soy protein. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, Champaign, v. 96, n. 4, p. 339-364, 2019. DOI: 10.1002/aocs.12196.
- LI, J.; VAN GERREWEY, T.; GEELEN, D. A meta-analysis of biostimulant yield effectiveness in field trials. *Frontiers in Plant Science*, Lausanne, v. 13, artigo 836702, 2022. DOI: 10.3389/fpls.2022.836702.
- LIMA, P. F.; COLOMBO, C. A.; CHIORATO, A. F.; YAMAGUCHI, L. F.; KATO, M. J.; CARBONELL, S. A. M. Occurrence of isoflavonoids in Brazilian common bean germplasm (*Phaseolus vulgaris* L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, Washington, v. 62, n. 40, p. 9699-9704, 2014. DOI: 10.1021/jf5033312.
- LUO, L.; ZHANG, Y.; XU, G. How does nitrogen shape plant architecture? *Journal of Experimental Botany*, Oxford, v. 71, n. 15, p. 4415-4427, 2020. DOI: 10.1093/jxb/eraa187.
- MAIA, S. C. M.; SORATTO, R. P.; LIEBE, S. M.; ALMEIDA, A. Q. Criteria for topdressing nitrogen application to common bean using chlorophyll meter. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 52, n. 7, p. 512-520, 2017. DOI: 10.1590/S1678-3921.pab2017.v52.22334.
- MARTINS, M. R.; SANT'ANNA, S. A. C.; ZAMAN, M.; SANTOS, R. C.; MONTEIRO, R. C.; ALVES, B. J. R.; JANTALIA, C. P.; BODDEY, R. M.;

- URQUIAGA, S. Strategies for the use of urease and nitrification inhibitors with urea: impact on N₂O and NH₃ emissions, fertilizer-¹⁵N recovery and maize yield in a tropical soil. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, Amsterdam, v. 247, p. 54-62, 2017. DOI: 10.1016/j.agee.2017.06.021.
- MENDOZA-SUÁREZ, M. A.; GEDDES, B. A.; SÁNCHEZ-CAÑIZARES, C.; RAMÍREZ-GONZÁLEZ, R. H.; KIRCHHELLE, C.; JORRIN, B.; POOLE, P. S. Optimizing Rhizobium-legume symbioses by simultaneous measurement of rhizobial competitiveness and N₂ fixation in nodules. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Washington, v. 117, n. 18, p. 9822-9831, 2020. DOI: 10.1073/pnas.1921225117.
- NADEEM, M. A.; YEKEN, M. Z.; SHAHID, M. Q.; HABYARIMANA, E.; YILMAZ, H.; ALSALEH, A.; HATİPOĞLU, R.; ÇİLESİZ, Y.; KHAWAR, K. M.; LUDIDI, N.; ERCİŞLİ, S.; AASIM, M.; KARAKÖY, T.; BALOCH, F. S. Common bean as a potential crop for future food security: an overview of past, current and future contributions in genomics, transcriptomics, transgenics and proteomics. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, Abingdon, v. 35, n. 1, p. 759-787, 2021. DOI: 10.1080/13102818.2021.1920462.
- PASCUAL, J. A.; ROS, M.; MARTÍNEZ, J.; CARMONA, F.; BERNABÉ, A.; TORRES, R.; LUCENA, T.; AZNAR, R.; ARAHAL, D. R.; FERNÁNDEZ, F. *Methylobacterium symbioticum* sp. nov., a new species isolated from spores of *Glomus iranicum* var. *tenuihypharum*. *Current Microbiology*, New York, v. 77, p. 2031-2041, 2020. DOI: 10.1007/s00284-020-02101-4.
- PEKŞEN, E. Dynamics of flower appearance, flowering, pod and seed setting performance and their relations to seed yield in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Pakistan Journal of Botany*, Karachi, v. 39, n. 2, p. 485-496, 2007.
- PUGA, A. P.; GRUTZMACHER, P.; CERRI, C. E. P.; RIBEIRINHO, V. S.; ANDRADE, C. A. Biochar-based nitrogen fertilizers: greenhouse gas emissions, use efficiency, and maize yield in tropical soils. *Science of the Total Environment*, Amsterdam, v. 704, artigo 135375, 2020. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135375.
- RAO, D. L. N.; BALACHANDAR, D. Nitrogen inputs from biological nitrogen fixation in Indian agriculture. In: ABROL, Y. P.; ADHYA, T. K.; ANEJA, V. P.; RAGHURAM, N.; PATHAK, H.; KULSHRESTHA, U.; SHARMA, C.; SINGH, B. (ed.). *The Indian nitrogen assessment: sources of reactive nitrogen*,

- environmental and climate effects, management options, and policies. London: Elsevier, 2017. p. 117-132.
- RODRIGUES, M. Â.; CORREIA, C. M.; ARROBAS, M. The application of a foliar spray containing *Methylobacterium symbioticum* had a limited effect on crop yield and nitrogen recovery in field and pot-grown maize. *Plants*, Basel, v. 13, n. 20, artigo 2909, 2024. DOI: 10.3390/plants13202909.
- SHIBATA, H.; GALLOWAY, J. N.; LEACH, A. M.; CATTANEO, L. R.; NOLL, L. C.; ERISMAN, J. W.; GU, B.; LIANG, X.; HAYASHI, K.; MA, L.; DALGAARD, T.; GRAVERSGAARD, M.; CHEN, D.; NANSAI, K.; SHINDO, J.; MATSUBAE, K.; OITA, A.; SU, M-C.; MISHIMA, S-I.; BLEEKER, A. Nitrogen footprints: regional realities and options to reduce nitrogen loss to the environment. *Ambio*, Stockholm, v. 46, n. 2, p. 129-142, 2017. DOI: 10.1007/s13280-016-0815-4.
- SILVA, G. C.; ARAUJO, M. E. V.; ALMEIDA, V. F. R.; ARAÚJO, R. S. L.; LOURENÇO, A. C. E.; LISBOA, C. F.; TEIXEIRA, I. R.; SILVA, M. B.; SOUSA, W. S.; SILVA, A. G.. Nitrogen fertilization management in common bean and castor bean intercropping systems. *Australian Journal of Crop Science*, Lismore, v. 14, n. 5, p. 842-851, 2020. DOI: 10.21475/ajcs.20.14.05.p2414b.
- SORATTO, R. P.; CRUSCIOL, C. A. C.; SILVA, L. M.; LEMOS, L. B. Aplicação tardia de nitrogênio no feijoeiro em sistema de plantio direto. *Bragantia*, Campinas, v. 64, n. 2, p. 211-218, 2005. DOI: 10.1590/S0006-87052005000200007.
- SOLTANI, A. WERADUWAGE, S. M.; SHARKEY, T. D.; LOWRY, D. B. Elevated temperatures cause loss of seed set in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) potentially through the disruption of source-sink relationships. *BMC Genomics*, London, v. 20, artigo 312, 2019. DOI: 10.1186/s12864-019-5669-2.
- SOUSA, W. S.; SORATTO, R. P.; PEIXOTO, D. S.; CAMPOS, T. S.; SILVA, M. B.; SOUZA, A. G. V.; TEIXEIRA, I. R.; GITARI, H. I. Effects of *Rhizobium* inoculum compared with mineral nitrogen fertilizer on nodulation and seed yield of common bean: a meta-analysis. *Agronomy for Sustainable Development*, Paris, v. 42, artigo 52, 2022. DOI: 10.1007/s13593-022-00784-6.
- VERA, R. T.; GARCÍA, A. J. B.; ÁLVAREZ, F. J. C.; RUIZ, J. M.; MARTÍN, F. F.. Application and effectiveness of *Methylobacterium symbioticum* as a biological inoculant in maize and strawberry crops. *Folia Microbiologica*, Prague, v. 69, p. 121-131, 2024. DOI: 10.1007/s12223-023-01078-4.

- VALENTE, F.; PANOZZO, A.; BOZZOLIN, F.; BARION, G.; BOLLA, P. K.; BERTIN, V.; POTESIO, S.; VISIOLI, G.; WANG, Y.; VAMERALI, T. Growth, photosynthesis and yield responses of common wheat to foliar application of *Methylobacterium symbioticum* under decreasing chemical nitrogen fertilization. *Agriculture*, Basel, v. 14, n. 10, artigo 1670, 2024. DOI: 10.3390/agriculture14101670.
- WUTKE, E. B.; CHIORATO, A. F.; ESTEVES, J. A. F.; CARBONELL, S. A. M.; AMBROSANO, E. J.; LEMOS, L. B.; SORATTO, R. P.; ARF, O.; CANTARELLA, H. Feijão (*Phaseolus vulgaris*). In: CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; MATTOS JÚNIOR, D.; BOARETTO, R. M.; van RAIJ, B. (ed.). Boletim 100: recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo. Campinas: IAC, 2022.
- ZARGAR, S. M.; MAHAJAN, R.; NAZIR, M.; NAGAR, P.; KIM, S. T.; RAI, V.; MASI, A.; AHMAD, S. M.; SHAH, R. A.; GANAI, N. A. Common bean proteomics: present status and future strategies. *Journal of Proteomics*, Amsterdam, v. 169, p. 239-248, 2017. DOI: 10.1016/j.jprot.2017.03.019.