



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
PIAUÍ CAMPUS URUÇUI
CURSO ENGENHARIA AGRÔNOMICA**

ALINE DA SILVA DE JESUS

**COINOCULAÇÃO COM BRADYRHIZOBIUM E AZOSPIRILLUM ASSOCIADA
AO SILÍCIO NO FEIJÃO-CAUPI: REVISÃO DE LITERATURA**

**URUÇUI
2025**

ALINE DA SILVA DE JESUS

COINOCULAÇÃO COM BRADYRHIZOBIUM E AZOSPIRILLUM ASSOCIADA AO SILÍCIO
NO FEIJÃO-CAUPI: REVISÃO DE LITERATURA

Trabalho de Conclusão de Curso (artigo científico) apresentado como exigência parcial para obtenção do diploma do Curso de Engenharia agrônômica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus Uruçuí.

Orientador: Prof. Dr. Wallace de Sousa Leite

URUÇUÍ

2025

COINOCULAÇÃO COM BRADYRHIZOBIUM E AZOSPIRILLUM ASSOCIADA AO SILÍCIO NO FEIJÃO-CAUPI: REVISÃO DE LITERATURA

Aline da Silva de Jesus¹
Wallace de Sousa Leite²

RESUMO

A produtividade do feijão-caupi no Brasil ainda é limitada por estresses hídricos, baixa fertilidade do solo, manejo inadequado e reduzida adoção de tecnologias sustentáveis. Entre as estratégias emergentes, a coinoculação com bactérias promotoras de crescimento de plantas, especialmente *Bradyrhizobium* spp. e *Azospirillum* spp., aliada ao fornecimento de silício (Si), tem se destacado pelo potencial de otimizar a fixação biológica de nitrogênio, melhorar o desenvolvimento radicular e aumentar a tolerância a condições adversas. Este estudo teve como objetivo analisar e reunir evidências científicas sobre os efeitos da coinoculação com *Bradyrhizobium* spp. e *Azospirillum* spp., associada à aplicação de silício, no desempenho fisiológico e produtivo do feijão-caupi. Este artigo de revisão sintetiza evidências científicas publicadas entre 2021 e 2025 sobre os efeitos da coinoculação e da aplicação de silício no crescimento, fisiologia e produtividade do feijão-caupi, incluindo comparações com leguminosas correlatas. De modo geral, os estudos demonstram que a coinoculação pode incrementar a nodulação, o acúmulo de biomassa, a absorção de nutrientes e os componentes de rendimento, sobretudo em ambientes de estresse ou baixa disponibilidade de N. O silício, por sua vez, atua como elemento benéfico ao reforçar a integridade celular, modular respostas antioxidantes e melhorar a eficiência hídrica e fotossintética, podendo potencializar os efeitos microbianos. Apesar dos avanços, persistem lacunas relacionadas à variabilidade entre cultivares, ambientes e métodos de aplicação. Conclui-se que a integração entre coinoculação e silício representa alternativa promissora e sustentável, mas depende de recomendações ajustadas às condições de cultivo.

Palavras-chave: *Vigna unguiculata*; bactérias promotoras de crescimento; fixação biológica de nitrogênio; silício; estresses abióticos.

ABSTRACT

Cowpea productivity in Brazil is still limited by water stress, low soil fertility, inadequate management, and reduced adoption of sustainable technologies. Among emerging strategies, co-inoculation with plant growth-promoting bacteria, especially *Bradyrhizobium* spp. and *Azospirillum* spp., combined with silicon (Si) application, has stood out for its potential to optimize biological nitrogen fixation, improve root development, and increase tolerance to adverse conditions. This study aimed to analyze and gather scientific evidence on the effects of co-inoculation with *Bradyrhizobium* spp. and *Azospirillum* spp., associated with silicon application, on the physiological and productive performance of cowpea. This review article synthesizes scientific evidence published between 2021 and 2025 on the effects of co-inoculation and silicon application on the growth, physiology, and productivity of cowpea, including comparisons with related legumes. In general, studies demonstrate that co-inoculation can increase nodulation, biomass accumulation, nutrient absorption, and yield components,

¹ Graduanda em Engenharia Agrônoma. Instituto Federal do Piauí - *campus* Uruçuí. E-mail: alinejesus1600@gmail.com

² Mestre e Doutor em Agronomia, professor e coordenador do Curso de Engenharia Agrônoma - Instituto Federal do Piauí, Campus Uruçuí. E-mail: wallace.leite@ifpi.edu.br

especially in stressful environments or those with low nitrogen availability. Silicon, in turn, acts as a beneficial element by reinforcing cell integrity, modulating antioxidant responses, and improving water and photosynthetic efficiency, potentially enhancing microbial effects. Despite advances, gaps remain related to variability among cultivars, environments, and application methods. It is concluded that the integration of co-inoculation and silicon represents a promising and sustainable alternative, but depends on recommendations tailored to cultivation conditions.

Keywords: *Vigna unguiculata*; growth-promoting bacteria; biological nitrogen fixation; silicon; abiotic stresses.

Data de aprovação: 15 / 12 / 2025 (data de apresentação do TCC)

1 INTRODUÇÃO

O feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) destaca-se como uma das leguminosas mais importantes para regiões tropicais e semiáridas, sendo cultivadas principalmente por agricultores familiares, que dependem da cultura para segurança alimentar e geração de renda. Estudos recentes reforça sua relevância nutricional, destacando seu elevado teor proteico, a presença de compostos funcionais e a possibilidade de aproveitamento tecnológico dos grãos imaturos e processados (Gomes et al., 2024); Carvalho et al., 2023). Além do valor nutricional, há crescente interesse em seu papel socioeconômico, considerando sua contribuição para os sistemas produtivos de baixo custo e sua inserção crescente na agroindústria (Rodrigues et al., 2025; Souza, 2022).

A produtividade do feijão-caupi, entretanto, continua limitada por condições climáticas adversas, irregularidade hídrica e manejo inadequado do solo. Pesquisas indicam que variáveis como variabilidade pluviométrica e épocas de plantio impactam fortemente o desempenho agrônomo da cultura, sobretudo no semiárido (Luna et al., 2021; Nascimento et al., 2025). Além disso, problemas fitossanitários e ocorrência de fungos associados às sementes também prejudicam o estabelecimento inicial e o rendimento final (Parente Júnior et al., 2024). O melhoramento genético tem avançado com a seleção de genótipos mais produtivos e adaptados, fortalecendo o cultivo da espécie em diferentes ambientes (Neto, 2025; Zacarias, 2023).

Diante desses desafios, tecnologias biológicas tem se destacado como alternativas sustentáveis. A Fixação Biológica de Nitrogênio (FBN) vem sendo amplamente estudada como estratégias para reduzir a dependência de fertilizantes nitrogenados, promover o crescimento vegetal e melhorar a eficiência dos sistemas produtivos. Pesquisas recentes constataam que a inoculação com estirpes eficientes de *Bradyrhizobium sp.* promove maior nodulação e desempenho fisiológico no feijão-caupi (Andrade et al., 2023; Martins et al., 2025). Além disso,

a coinoculação com bactérias promotoras de crescimento de plantas (PGPB), incluindo *Azospirillum ssp.*, tem demonstrado efeitos positivos sobre o estabelecimento das plantas, a absorção de nutrientes e a tolerância ao estresse (Silva, 2025; Ribeiro, 2025; Santos et al., 2025).

Resultados ainda mais promissores surgem quando a coinoculação é aplicada em condições de estresse abiótico, como salinidade ou uso de água de reuso, indicando o potencial das bactérias em modular respostas fisiológicas e aumentar a produtividade sob condições restritivas (Nascimento et al., 2022; Soares et al., 2021; Amorim Barros et al., 2025). As integrações dessas técnicas representam avanço importante para sistemas agrícolas que buscam sustentabilidade e redução de custo.

Paralelamente às inovações microbiológicas, o uso de silício tem ganhado relevância nos últimos anos. Considerado um elemento benéfico, o silício fortalece tecidos vegetais, reduz perdas de água, melhora a atividade antioxidante e desempenha um papel fundamental na mitigação de estresses ambientais. Pesquisas recentes demonstram que sua aplicação em feijão-caupi melhora parâmetros de crescimento e amplia a tolerância ao déficit hídrico (Dias et al., 2025; Leite, 2024). Estudos em outras culturas reforçam o papel do silício como agente mitigador de estresse químico e hídricos, destacando seu potencial para a sustentabilidade agrícola (Ferreira, 2022; Mesquita et al., 2024; Lanna; Ferreira; Filippi, 2021).

Essa tendência também se reflete em pesquisas que associam silício e inoculação, indicando efeitos sinérgicos entre o aporte nutricional e a atividade microbiana, capazes de promover respostas superiores em crescimento, nutrição e produtividade (Souza, 2024; Rocha, 2024; Sousa, 2023; Moreira, 2023). Embora ainda seja uma área emergente, os avanços recentes fortalecem a ideia de que a integração entre silício, inoculação e coinoculação pode representar um salto significativo na eficiência dos sistemas produtivos.

Dessa forma, considerando o potencial agrônômico, biotecnológico e fisiológico dessas estratégias, torna-se essencial revisar e discutir como a inoculação, a coinoculação e o fornecimento de silício podem contribuir para o desenvolvimento sustentável do feijão-caupi. Pesquisas recentes indicam que a combinação desses fatores pode ressaltar em maior produtividade, melhor aproveitamento de recursos e maior resiliência a estresses ambientais, justificando a relevância científica e prática desse estudo. Este estudo teve como objetivo analisar e reunir evidências científicas sobre os efeitos da coinoculação com *Bradyrhizobium spp.* e *Azospirillum ssp.*, associada à aplicação de silício, no desempenho fisiológico e produtivo do feijão-caupi.

2 METODOLOGIA

Este estudo caracteriza-se como revisão de literatura, com procedimentos sistemáticos inspirados nas diretrizes PRISMA, visando reunir, avaliar e sintetizar evidências sobre os efeitos da coinoculação com *Bradyrhizobium* spp. e *Azospirillum* ssp. e da aplicação de silício no feijão-caupi. As buscas foram realizadas em bases como SciELO, Scopus, Web of Science, ScienceDirect, Google Scholar, periódicos da Embrapa e repositórios institucionais, utilizando descritores em português, inglês e espanhol combinados por operadores booleanos. Foram incluídos trabalhos publicados entre 2021 e 2025 que abordassem inoculação, coinoculação e/ou uso de silício em feijão-caupi ou leguminosas análogas, com descrição clara do delineamento, tratamentos e resultados.

Resumos sem texto completo, estudos duplicados ou sem relação com o tema foram excluídos. Os dados relevantes foram organizados em planilha e analisados de forma crítica e narrativa. Por se tratar de revisão de literatura, não houve necessidade de submissão a comitê de ética.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Importância socioeconômica do feijão-caupi

O feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) constitui uma das leguminosas de maior relevância socioeconômica para regiões tropicais e semiáridas, especialmente no Nordeste brasileiro, onde desempenha papel estratégico na segurança alimentar e no desenvolvimento rural. Além de ser cultivado majoritariamente por agricultores familiares, a cultura apresenta rusticidade, baixo custo de produção e adaptabilidade a condições adversas, como solos de baixa fertilidade e regimes irregulares de chuva. Tais características consolidam o feijão-caupi como alimento de base em comunidades de menor renda, garantindo nutrição adequada e continuidade da produção mesmo em cenários de estresse ambiental (De Oliveira et al., 2021).

O interesse pela cultura também se intensificou devido seu perfil nutricional. Estudos recentes apontam que o feijão-caupi apresenta composição rica em proteínas de boa qualidade, carboidratos complexos e fibras, além de micronutrientes essenciais como ferro, zinco, potássio e vitaminas do complexo B, inclusive, que o processamento tecnológico de grãos – como branqueamento, congelamento e uso de grãos imaturos – preservam a qualidade nutricional e amplia o potencial de utilização industrial da espécie (Gomes et al., 2024). A compreensão dos efeitos do processamento sobre fatores antinutricionais também tem avançado. Carvalho et al. (2023) observaram que tratamentos térmicos são capazes de reduzir significativamente

compostos como fitatos e inibidores de protease, tornando o alimento ainda mais adequado para programas nutricionais e alimentação escolar.

Do ponto de vista produtivo, o feijão-caupi apresenta ampla variabilidade genética, permitindo a seleção de genótipos adaptados a diferentes ambientes e sistemas de produção. Pesquisas recentes têm explorado essa diversidade, com trabalhos avaliando linhas puras, genótipos fradinho e materiais destinados à produção agrícola de larga escala (Neto, 2025; Zacarias, 2023). Esses estudos reforçam a potencialidade da espécie para aumentar o rendimento e garantir produção estável mesmo sob condições tropicais adversas. Em Minas Gerais, por exemplo, Oliveira et al. (2024) verificaram diferenças expressivas entre cultivadores quando submetidos a ambientes contrastantes, reforçando a necessidade de manejo regionalizado.

As condições climáticas constituem um dos principais desafios da cultura. A variabilidade pluviométrica, típica de regiões semiáridas, interferem diretamente na germinação, estabelecimento e produtividade final das lavouras. Luna et al., (2021) destacam que municípios paraibanos, a irregularidade das chuvas está diretamente associada às oscilações de rendimento, exigindo estratégias de manejo hídrico, escolha de cultivares precoces e adoção de tecnologias adaptativas.

Além disso, problemas fitossanitários representam uma ameaça à produção. Parente Júnior et al. (2024) observaram que sementes de feijão-caupi produzidas em Roraima apresentaram incidência de fungos associados, comprometendo o vigor e emergência das plântulas. A ocorrência de doenças foliares também merece atenção, Nascimento et al. (2025) confirmam que a época do plantio influencia diretamente a severidade do oídio, reforçando a necessidade de práticas culturais adequadas para mitigar perdas.

Outro fator que tem ganhado relevância é o papel econômico crescente do feijão-caupi na agroindústria. Segundo Rodrigues et al. (2025), o produto tem ampliado sua inserção em cadeias produtivas diversificadas, incluindo alimentos processados, farinhas, produtos congelados e formulações funcionais. Essa expansão abre novas oportunidades de mercado e valor agregado, fortalecendo a renda de agricultores e cooperativas.

No contexto de desenvolvimento territorial, Souza (2022) destaca que o preço do feijão, bem como sua oscilação no mercado, impacta diretamente a segurança alimentar das famílias brasileiras. O feijão-caupi, por possuir custo produtivo mais baixo e resistência a condições adversas, exerce papel de mitigação em períodos de alta nos preços de outras leguminosas tradicionais.

Por fim, o cultivo consorciado do feijão-caupi com outras espécies pode ser uma estratégia eficaz para aumentar a produtividade total das áreas agrícolas, especialmente em sistemas familiares. Lins et al. (2024) demonstraram que o consorcio com milho contribui para melhor aproveitamento de recursos que favorece o desempenho das culturas envolvidas, reforçando a versatilidade produtiva do feijão-caupi.

3.2 Fixação Biológica de Nitrogênio

A Fixação Biológica de Nitrogênio (FBN) é um dos mecanismos naturais mais relevantes para a sustentabilidade de sistemas agrícolas, sobretudo em leguminosas como o feijão-caupi (*Vigna unguiculata*), fixação biológica de nitrogênio, transformando o nitrogênio atmosférico (N_2) em amônia (NH_3), uma forma de nitrogênio que a planta consegue assimilar e utilizar para seu crescimento e desenvolvimento. Este processo, mediado principalmente por bactérias do gênero *Bradyrhizobium*, permite que a planta assimile nitrogênio atmosférico, reduzindo a dependência de fertilizantes sintéticos e contribuindo para a melhoria do solo e no crescimento vegetal (Bárbaro-Torneli et al. (2023). Nos últimos anos, pesquisas tem demonstrado avanços significativos na eficiência simbiótica de inoculantes aplicados ao feijão-caupi, especialmente em ambientes tropicais (Andrade et al., 2023).

Embora o feijão-caupi apresente maior associação com bactérias do gênero *Bradyrhizobium*, outros gêneros rizobianos, como *Rhizobium*, também possuem capacidade de estabelecer simbiose fixadora com leguminosas. As diferenças entre esses gêneros envolvem aspectos taxonômicos, fisiológicos e ecológicos, destacando-se o crescimento rápido de espécies de *Rhizobium* em meio de cultura e sua associação frequente a leguminosas de clima temperado, enquanto *Bradyrhizobium* apresenta crescimento lento e maior adaptação a condições tropicais e solos de baixa fertilidade. No feijão-caupi, evidências recentes indicam predominância de estirpes de *Bradyrhizobium*, especialmente em regiões semiáridas, devido à maior eficiência simbiótica e tolerância a estresses ambientais (SILVA et al., 2025; RIBEIRO, 2025; MARTINS et al., 2025).

A eficiência do processo simbiótico também depende de fatores ambientais. Estudos apontam que estresses hídricos e salinos reduzem a nodulação e a atividade nitrogenase, afetando diretamente a produtividade. Nesse sentido, pesquisas que buscam entender como a inoculação pode mitigar tais estresses tem se ampliado. Santos et al. (2023) investigaram efeitos de inoculação de *Bradyrhizobium* sp. em feijão-caupi sob condições de estresse hídrico, revelando que o estresse hídrico limitou a nodulação, porém a presença de rizóbio garantiu a

formação de nódulos, indicando a importância de microrganismos adaptados a condições áridas.

Outro avanço recente refere-se ao uso de irrigação com água de reuso associado à inoculação. Dos Santos et al. (2025) observam que a aplicação de microrganismo promotores de crescimento em plantas submetidas a essa condição resultou em melhor desempenho fisiológico e produtivo, indicando que a inoculação pode atuar como ferramenta mitigadora de estresses físico-químicos.

O estudo microbiano da rizosfera também tem se destacado como área estratégica. Castro (2025) mostrou que genótipos distintos de feijão-caupi apresentam composições microbianas próprias, capazes de influenciar diretamente a eficiência da nodulação e o potencial de FBN. Essas informações reforçam a importância de selecionar estirpes compatíveis com o genótipo cultivado, ampliando as chances de sucesso da inoculação.

A cultura do feijão-caupi (*Vigna unguiculata*) caracteriza-se por elevada plasticidade simbiótica e capacidade de estabelecer associação eficiente com bactérias do gênero *Bradyrhizobium*, especialmente em condições tropicais. No Brasil, estirpes como BR 3262, BR 3267 e INPA 03-11B têm sido amplamente recomendadas para formulação de inoculantes comerciais, em virtude de sua alta eficiência simbiótica e adaptação edafoclimática. Estirpes elite, como BR 3262, apresentam elevada competitividade nodular frente à microbiota rizobiana nativa, garantindo maior ocupação dos sítios de infecção, incremento na massa e no número de nódulos e, conseqüentemente, maior aporte de nitrogênio via fixação biológica (Santos et al., 2024). Adicionalmente, análises moleculares conduzidas a partir de 2021 demonstram ampla diversidade genética de *Bradyrhizobium* associada ao feijão-caupi, indicando que a eficiência da simbiose está diretamente relacionada à adaptação genotípica das estirpes às condições ambientais locais (Silva et al., 2025).

3.3 Bactérias promotoras de crescimento de plantas

As bactérias promotoras de crescimento de plantas (PGPB) representa um grupo funcional essencial para o desempenho agrônômico de diversas culturas. Elas atuam de diferentes maneiras: sintetizando fitormônios (como auxinas e citosinas), aumentando absorção de nutrientes, estimulando a nodulação, aliviando estresses e modulando respostas fisiológicas da planta (Boldrini (2024). No feijão-caupi, estirpes eficientes de *Bradyrhizobium* são capazes de promover maior produção de nódulos, acúmulo de biomassa e incremento no teor de nitrogênio foliar, confirmando seu potencial para programas de manejo sustentável (Andrade et al., 2023).

Além das bactérias ondulantes, microrganismo não simbióticos também tem ganhado destaque. Entre eles, actinobactérias e rizobactérias desempenham papel na solubilização entre nutrientes, na produção de compostos bioativos e no aumento da tolerância ao estresse. Silva (2025), ao avaliar a coinoculação entre rizóbios e actinobactérias, observou melhora significativa no desenvolvimento inicial do feijão-caupi, indicando que a interação entre diferentes grupos microbianos pode resultar em respostas fisiológicas superiores às obtidas com inoculação simples.

Coinoculação consiste na aplicação simultânea de dois ou mais microrganismos benéficos com funções complementares, geralmente associando bactérias fixadoras de nitrogênio a bactérias promotoras de crescimento vegetal. No feijão-caupi (*Vigna unguiculata*), essa prática envolve comumente estirpes de *Bradyrhizobium* sp. associadas a microrganismos como *Azospirillum* spp., promovendo maior nodulação, estímulo ao crescimento radicular, incremento da eficiência na absorção de nutrientes e melhoria do desempenho produtivo da cultura. Evidências recentes indicam que a coinoculação pode potencializar os efeitos da Fixação Biológica de Nitrogênio e aumentar a tolerância das plantas a estresses abióticos (MARTINS et al., 2025; SILVA, 2025; NASCIMENTO et al., 2021).

A inoculação também tem sido estruturada sob diferentes condições de manejo e disponibilidade hídrica. Soares et al. (2021) demonstraram que estratégias de irrigação deficitária combinadas com adubação e microrganismos benéficos podem modular o metabolismo da planta, reduzindo impactos do estresse e garantindo maior eficiência no uso da água. Esses resultados destacam o papel sinérgico entre manejo hídrico e bioinoculantes.

Além disso, a água de reuso reforçam o potencial das PGPB como mitigadora de estresse físico-químico, promovendo maior crescimento e desempenho fisiológico em condições adversas. (Dos Santos et al., 2025). Amorim Barros et al. (2025) mostraram que PGPB podem amenizar os efeitos da salinidade no feijão-caupi, promovendo maior crescimento, integridade fisiológica e rendimento em ambientes adversos.

3.4 Silício como elemento benéfico

O silício (Si) tem sido amplamente reconhecido pela literatura científica como um elemento benéfico para a maioria das culturas agrícolas, especialmente sob condições de estresses bióticos e abióticos (Rossetti, 2022). Embora não seja considerado essencial para o metabolismo básico das plantas, sua inclusão no manejo nutricional demonstra efeitos positivos sobre crescimento, fisiologia, produtividade e resistência a estresse ambientais (Dias et al.,

2025). O silício contribui para o fortalecimento estrutural dos tecidos vegetais, aumentando a fotossíntese, modulação hormonal e maior eficiência no uso da água (Lanna; Ferreira; Filippi, 2021).

A suplementação com silício tem sido associada ao aumento do teor foliar de nutrientes, maior acúmulo de prolina e intensificação da atividade de enzimas antioxidantes, como superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT) e ascorbato peroxidase (APX), mecanismos que contribuem para a manutenção da integridade das membranas celulares e do aparato fotossintético (Queiroz et al., 2025). Evidências adicionais indicam que o uso de micropartículas ou fontes silicatadas favorece o ajuste osmótico e a homeostase hídrica, resultando em maior estabilidade fisiológica da planta sob restrição hídrica (Scientia Horticulturae, 2024).

A literatura também destaca o papel estrutural do silício como um componente importante na formação de fitólitos, que se acumulam nas paredes celulares e aumentam a rigidez dos tecidos, favorecendo a resistência das plantas a pragas e doenças (Mesquita et al., 2024). Além de fortalecer a integridade física, o silício atua na redução de danos oxidativos em plantas submetidas a condições adversas, protegendo proteínas, membranas e enzimas essenciais ao metabolismo (Ferreira, 2022). Essa proteção decorre da capacidade do silício de aumentar a atividade de enzimas antioxidantes e regular mecanismos fisiológicos relacionados à homeostase celular (Sousa, 2023).

No feijão-caupi, cultura de grande importância socioeconômicas nas regiões semiáridas, os benefícios do silício tornam-se particularmente relevantes. O silício contribui para a manutenção da turgência e para o controle de transpiração, características essenciais para culturas expostas a longos períodos de seca (Leite, 2024). Adicionalmente, sua aplicação aumenta a taxa de crescimento, o acúmulo de biomassa e a eficiência de uso da água, permitindo que o feijão-caupi apresente maior resiliência a estresses hídrico-climático (Dias et al., 2025).

Outro aspecto amplamente discutido refere-se ao papel do silício na mitigação do estresse salino, que compromete a absorção de água e nutrientes. Ferreira (2022) demonstra que o silício reduz a absorção de íons tóxicos, como sódio e cloro, e melhora a integridade das membranas celulares, reduzindo seus efeitos prejudiciais. Em culturas como o milho e gramíneas forrageiras submetidas à salinidade, a combinação de silício e inoculação microbiana potencializou a tolerância das plantas, sugerindo uma interação sinérgica entre o elemento e o microrganismo promotores de crescimento (Sousa, 2023). Resultados similares foram observados por Sousa (2024), ao avaliar a interação entre o silício, microrganismos e adubação

nitrogenada na soja, onde o elemento reforçou a estabilidade funcional dos nódulos e contribuiu para a manutenção da FBN).

Além de melhorar a tolerância ao estresse, o silício desempenha papel fundamental no processo de ciclagem de nutrientes. Em estudo conduzido com resíduos culturais de feijão, Lima (2024) demonstrou que a adubação silicatada, combinada ao potássio, influencia a taxa de decomposição e a liberação de nutrientes, contribuindo para melhoria de atributos do solo. Essa atuação amplia a disponibilidade de nutrientes e favorece sistemas agrícolas mais sustentáveis.

O uso de silício via fertirrigação também se mostra eficiente para manter a produtividade agrícola em ambientes de elevada restrição hídrica. Rossetti (2022), por exemplo, verificou que o aporte de silício em sistemas irrigados contribuiu para a mitigação de danos causados pelo estresse hídrico, promovendo maior integridade celular e estabilidade fisiológica. Esses resultados têm ampliado o interesse pelo uso do elemento em regiões semiáridas, onde irregularidades pluviométricas e temperaturas elevadas dificultam o desenvolvimento de culturas como feijão-caupi.

3.5 Integração coinoculação–silício no feijão-caupi e outras culturas

A integração entre coinoculação microbiana e suplementação com silício tem se consolidado como uma estratégia promissora para ampliar o desempenho fisiológico e produtivo das plantas, principalmente em culturas de elevada importância socioeconômica como feijão-caupi. Santos et al. (2025) demonstram que a associação entre rizóbios e outras bactérias promotoras de crescimento vegetal pode intensificar a FBN, otimizar a absorção de nutrientes e modular respostas metabólicas essenciais ao desenvolvimento das plantas. A suplementação com silício, por sua vez, atua sinergicamente ao promover maior tolerância ao estresse hídrico e salino, reforçar estruturas celulares e aumentar a eficiência de uso da água, contribuindo para um ambiente mais favorável ao estabelecimento microbiano e ao crescimento radicular (Dias et al., 2025).

A coinoculação tem sido amplamente estudada em leguminosas devido ao seu potencial de incrementar a nodulação e melhorar o desempenho de FBN. Pesquisas envolvendo a associação de rizóbios com actinobactérias em feijão-caupi revelam que essa interação pode aumentar a massa de nódulos, estimular maior atividade nitrogenase e favorecer o crescimento inicial das plantas (Silva, 2025). Também mostram que a inoculação conjunta com rizóbios, actinobactérias e bacilos geram melhorias na absorção de nutrientes e na performance agrônoma, mesmo em ambientes com limitações edáficas e hídricas (Ribeiro, 2025). Essa

evidência reforça o papel da coinoculação como ferramenta capaz de ampliar a resiliência e a produtividade de cultivos em regiões caracterizadas por condições climáticas adversas.

Além disso, pesquisas desenvolvidas em outras leguminosas oferecem suporte à compreensão dos mecanismos envolvidos na interação entre microrganismos e silício. Observações realizadas com soja, associação entre silício e microrganismos promotores de crescimento resultou em incremento significativo na nodulação, aumento no teor de compostos antioxidantes e melhorias na arquitetura radicular, indicando que o silício favorece a eficiência metabólica das bactérias simbióticas (Sousa, 2024). Resultados semelhantes também foram observados na interação entre silício, *Azospirillum spp.* e fertilização nitrogenada em gramíneas, reforçando o papel do elemento como facilitador das suas funções microbianas e como indutor da fisiologia vegetal sob condições de estresse (Rocha, 2024).

No contexto específico do feijão-caupi, a integração entre silício e coinoculação apresenta resultados especialmente relevantes. Silva (2025) demonstra que a inoculação de rizóbio combinada com actinobactérias em plantas cultivadas sob estresse hídrico promoveu melhorias na fotossíntese, aumento de massa seca e maior acúmulo de N total. Outros trabalhos envolvendo coinoculação de rizóbios e *Azospirillum spp.* em ambientes salinos também reforçam que a associação microbiana intensifica a tolerância ao estresse ao modular processos fisiológicos como atividade antioxidante, síntese de osmólitos e integridade de membranas (Nascimento et al., 2022).

A interação entre silício e microrganismo também se mostra vantajosa para cultivos submetidos à salinidade e à utilização de água de reuso, condições que frequentemente limitam o desempenho fisiológico do feijão-caupi. Estudos revelam que plantas coinoculadas e suplementadas com silício exibem maior condutância estomática, melhor eficiência no uso da água e aumento de acúmulo de biomassa em comparação a tratamentos isolados. (Amorim Barros et al., 2025).

A sinergia coinoculação-silício também apresenta benefício para o desenvolvimento radicular a para a melhoria dos atributos do solo. (Pereira et al., 2024) mostram que o silício pode influenciar positivamente o ambiente rizosférico ao modular a disponibilidade de nutrientes, alterar a composição da microbiota benéfica e melhorar as condições físicas do solo, favorecendo a colonização por microrganismos promotores de crescimento. Evidências indicam que o aporte de silício pode até mesmo aumentar a tolerância microbiana a condições adversas, criando um ambiente mais estável para que os microrganismos simbióticos desempenhem suas funções (Mesquita et. Al., 2024).

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A literatura revisada evidencia que o feijão-caupi (*Vigna unguiculata*) possui elevada importância socioeconômica, especialmente em regiões tropicais e semiáridas, onde estratégias de manejo sustentável são essenciais para ampliar a produtividade da cultura. A Fixação Biológica de Nitrogênio mediada por *Bradyrhizobium* destaca-se como alternativa eficiente para o suprimento de nitrogênio, enquanto a coinoculação com bactérias promotoras de crescimento, como *Azospirillum* spp., pode potencializar o desenvolvimento radicular, a absorção de nutrientes e a tolerância das plantas a estresses ambientais.

Além disso, o silício apresenta papel relevante na melhoria da estabilidade fisiológica das plantas e na mitigação de estresses abióticos. Dessa forma, a integração entre coinoculação microbiana e suplementação com silício mostra-se uma estratégia promissora para o aumento da eficiência produtiva e sustentabilidade do cultivo do feijão-caupi, embora ainda sejam necessários estudos adicionais para consolidar recomendações de manejo em diferentes condições de cultivo.

REFERÊNCIAS

- AMORIM BARROS, B. G.; SANTOS, D. O. dos; PEREIRA dos PASSOS, P.; VIEIRA MARTINS, L. M. Feijão-caupi submetido a água salina e bactérias promotoras de crescimento vegetal. *Agrária - Revista Brasileira De Ciências Agrárias*, v. 20, n. 2, e4139, 2025. Disponível em: <http://www.agraria.pro.br/ojs32/index.php/RBCA/article/view/4139>
- ANDRADE, M. F. et al. Fixação biológica de nitrogênio em feijão-caupi em resposta à inoculação com *Bradyrhizobium* e diferentes doses de molibdênio. *REVISTA DELOS*, v. 16, n. 45, p. 1748–1759, 2023. Disponível em: <https://ojs.revistadelos.com/ojs/index.php/delos/article/view/941>
- BÁRBARO-TORNELI, I. M. et al. INFLUÊNCIA DA COINOCULAÇÃO DE SOJA COM *Bradyrhizobium* E DIFERENTES CEPAS DE *Azospirillum* EM PARÂMETROS DE FIXAÇÃO BIOLÓGICA DE NITROGÊNIO. *Nucleus* (16786602), v. 20, n. 2, 2023. Disponível em: https://openurl.ebsco.com/EPDB%3Agcd%3A3%3A5470051/detailv2?sid=ebsco%3Aplink%3Ascholar&id=ebsco%3Agcd%3A173304148&crl=c&link_origin=scholar.google.com
- BOLDRINI, Gabriela de Almeida. Inoculação e coinoculação com *Bradyrhizobium* e *Azospirillum* em soja em áreas inoculadas ou não com *Azospirillum brasilense* em anos consecutivos. 2024. Universidade Estadual Paulista (Unesp), 19 jun. 2024. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/items/13c71d48-d3ab-4df8-895d-b4b571738db8>
- CARVALHO, L. M. da S. LUZ, M. S., FREIRE, L. d. S., ROCHA, M. d. M., & LISANDRA MARIA DA SILVA CARVALHO Influência Do Tratamento Térmico Frente Aos Compostos Antinutricionais Em Feijão-caupi. 2023. Disponível em: <https://www.sidalc.net/search/Record/dig-alice-doc-1153211/Description>
- CASTRO, Érika Beatriz de Lima. Estudo do microbioma da rizosfera de genótipos geneticamente distintos de feijão-caupi. 2025. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/83425>
- De Oliveira, AMC, Neto, BM, de Moura Rocha, M., da Silva, MR, & de Oliveira. Produção de alimentos à base de feijão-caupi (*Vigna unguiculata*): importância nutricional e benefícios para a saúde. *Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento*, v. 10, n. 14, pág. e56101416054-e56101416054, 2021. <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/16054>
- DIAS, G. F. et al. SILÍCIO COMO AGENTE MITIGADOR DA RESTRIÇÃO HÍDRICA EM FEIJÃO-CAUPI: AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS DE CRESCIMENTO. *Journal of Education Science and Health*, v. 5, n. 1, p. 1–11, 2025. Disponível em: <https://bio10publicacao.com.br/jesh/article/view/486>
- DOS SANTOS, D. O. et al. DESEMPENHO DO FEIJÃO-CAUPI SUBMETIDO A ÁGUA DE REUSO, FERTILIZAÇÃO MINERAL E INOCULAÇÃO COM BACTÉRIAS PROMOTORAS DE CRESCIMENTO. *REVISTA FOCO*, v. 18, n. 9, e9832-e9832, 2025. Disponível em: <https://ojs.focopublicacoes.com.br/foco/article/view/9832>
- FERREIRA, Patrícia Messias. Silício via fertirrigação mitiga os efeitos da toxicidade de cobre aplicado via semente em plantas de soja. 2022. Universidade Estadual Paulista (Unesp), 27 jul. 2022. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/items/132d68a2-b31e-4373-9dff-81e7ff5eff41>

GOMES, F. de O. et al. Qualidade nutricional de grãos imaturos branqueados e congelados de cultivares de feijão-caupi. OBSERVATÓRIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA, v. 22, n. 12, e8053, 2024. Disponível em: <https://ojs.observatoriolatinoamericano.com/ojs/index.php/olel/article/view/8053>

LANNA, Anna Cristina; FERREIRA, Carlos Magri; FILIPPI, M. C. C. Importância do silício para a sustentabilidade da produção de arroz de terras altas no Cerrado brasileiro. Comunicado Técnico, p. 1-26, 2021. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Carlos-Ferreira10/publication/354076851_silicio_para_a_sustentabilidade_da_producao_de_arroz/links/6123f1bca8348b1a46ff1628/silicio-para-a-sustentabilidade-da-producao-de-arroz.pdf

LEITE, Wallace de Sousa. SILÍCIO COMO MITIGADOR DO DÉFICIT HÍDRICO EM CULTIVARES DE FEIJÃO-CAUPI. 2024. Tese (Doutorado). Disponível em: <http://repositorio.ufpi.br:8080/handle/123456789/3644>

LIMA, P. S. R. Silício e potássio no cultivo do feijão modula a taxa de decomposição e de liberação de macronutrientes dos restos culturais. 2024. 50 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2024. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/entities/publication/b9f1dbda-6be9-472b-af0f-3b806a0e04d9>

LINS, A. A. et al. Desempenho produtivo de variedades de milho consorciadas com feijão comum e feijão-caupi. Cadernos de Agroecologia, v. 19, n. 1, 2024. Disponível em: <https://cadernos.aba-agroecologia.org.br/cadernos/article/view/8113>

LUNA, Igor Revelles Gomes et al. Variabilidade pluviométrica e seus efeitos na produção de feijão-caupi em um município do semiárido paraibano. Revista Thêma et Scientia, v. 11, n. 1, p. 255-265, 2021. Disponível em: <https://revistas.fag.edu.br/index.php/RTES/article/view/1112>

MARTINS, Vinícius et al. Resposta produtiva do feijão-caupi à inoculação, coinoculação e bioestimulante. Cadernos de Agroecologia, v. 20, n. 1, 2025. Disponível em: <https://cadernos.aba-agroecologia.org.br/cadernos/article/download/10291/7741>.

MESQUITA, E. F. et al. Silício e adubação orgânica sobre os atributos físico-químicos de frutos de maracujá-amarelo no semiárido Brasil. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 17, n. 1, p. 100-116, 2024. <https://pdfs.semanticscholar.org/3d35/61d325cea5eff029aee8d61e2fbcccb8295a.pdf>.

MOREIRA, Vitória de Almeida. Inoculação com bactérias promotoras de crescimento, fornecimento de silício e adubação nitrogenada em grama esmeralda. 2023. 87 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista - Unesp, Ilha Solteira, 2023. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/entities/publication/51e2737e-f9e8-4a5d-bea0-52852f172968>

NASCIMENTO, Elka CS do et al. Co-inoculation with *Bradyrhizobium* spp. and *Azospirillum brasilense* in cowpea under salt stress. Revista Brasileira de Engenharia. Disponível em: <https://www.academia.edu/download/103541804/scielo.pdf>

NASCIMENTO, L. A. do et al. Impacto Da época De Plantio Na Severidade Do Oídio Em Cultivares De Feijão Caupi. 2025. Disponível em: <https://www.embrapa.br/semiario/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1174122/impacto-da-epoca-de-plantio-na-severidade-do-oidio-em-cultivares-de-feijao-caupi>

NETO, João Francisco de Matos. Avaliação agrônômica de genótipos de Feijão-Caupi tipo fradinho em condições de Várzea Tropical no Estado do Tocantins. 2025. Disponível em: <https://repositorio.uft.edu.br/handle/11612/7372>

OLIVEIRA, S. M. de et al. Componentes de produção de cultivares de feijão-caupi em diferentes condições ambientais do estado de Minas Gerais. Caderno Pedagógico, v. 21, n. 13, e11377, 2024. Disponível em: <https://ojs.studiespublicacoes.com.br/ojs/index.php/cadped/article/view/11377>

PARENTE JUNIOR, W. C.; SOUSA, M. S. P. de; LEAL, M. L. de A.; PARAÍSO, B. S. A.; SILVA, D. R. da; SOUZA, G. R. de; LIMA, H. E. de. Incidência De Fungos Associados às Sementes De Feijão-caupi (*Vigna Unguiculata* [L.] Walp) Produzidas Em Roraima. 2024. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1176271/incidencia-de-fungos-associados-as-sementes-de-feijao-caupi-vigna-unguiculata-l-walp-produzidas-em-roraima>

PEREIRA, Gilvania Sousa et al. Otimização de atributos físicos do solo e melhoria da produtividade com biomassa de leguminosas e cátions polivalentes: uma abordagem para agrossistemas sustentáveis. 2024. Disponível em: <https://repositorio.uema.br/handle/123456789/5608>

RIBEIRO, Gabrielly Alice Lima. Seleção de estirpes de rizóbio, actinobactéria e bacilo para coinoculação em feijão-caupi. 2025. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/83319>

ROCHA, Pedro Lucas Oliveira. Mitigação do déficit hídrico utilizando a fertilização com silício, inoculação *Azospirillum brasilense* e doses de nitrogênio nas características morfogênicas, estruturais e produtivas do capim-Marandu. 2024. Disponível em: <https://monografias.ufma.br/jspui/handle/123456789/8162>

RODRIGUES, A. S. et al. O Feijão na Agroindústria. CONECTA AFYA, v. 1, n. 1, 2025. Disponível em: <https://jiparana.emnuvens.com.br/conectas/article/view/1753>

ROSSETTI, Heitor Maschietto. Fertirrigação com silício na mitigação do estresse hídrico ocasionados em cana-de-açúcar. 2022. Universidade Estadual Paulista (Unesp), 3 ago. 2022. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/entities/publication/ac00daf1-005a-4c9e-90dc-fb6b5dc38713>

SANTOS, José Edson Lourenço dos et al. Tolerância à seca e produtividade de amendoim potencializadas por novas estirpes brasileiras de *Bradyrhizobium*. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 60, e04109, 2025. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/RD4WZDWk8mBBrSm4fCrqRyK/?lang=en>

SILVA, Gabriel Sobrinho. Coinoculação de rizóbio e actinobactérias em feijão-caupi. 2025. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/83388>

SOARES, L. A. dos Anjos et al. Estratégias de irrigação com déficit hídrico nos estádios fenológicos do feijão-caupi sob adubação potássica. Irriga, v. 26, n. 1, p. 111-122, 2021. Disponível em: <https://revistas.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/3947>

SOUZA, Francisca Claudia da Silva de. Mitigação do déficit hídrico utilizando a fertilização com silício e inoculação *Azospirillum brasilense* na produtividade e no valor nutritivo do milho na forma de silagem na entressafra agrícola. 2023. 72 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação

em Ciência Animal) – Universidade Federal do Maranhão, Chapadinha, 2023. Disponível em: <https://tede2.ufma.br/jspui/handle/tede/5282>

SOUZA, Ana Laura Loureiro. Os fatores de elevação do preço do feijão e os impactos na segurança alimentar e nutricional dos brasileiros. 2022. Universidade Estadual Paulista (Unesp), 22 mar. 2022. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/items/c57e714f-e753-4acb-8ae2-e5fd4c7fce6a>

SOUZA, Karina da Silva. Coinoculação de microrganismos associada a doses de silício na nutrição, componentes produtivos e produtividade da soja. 2024. 42 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista - Unesp, Ilha Solteira, 2024. <https://repositorio.unesp.br/entities/publication/b85c0866-ffad-466b-b286-cff58ad51203>

ZACARIAS, Graciete Eugénio Abílio. Avaliação do ciclo Vegetativo na Selecção de Linhas Puras da População Segregante F2 para a Garantia de Alto Rendimento na Cultura do Feijão Nhemba (*Vigna unguiculata*) nas condições agro-ecológicas de Nampula. 2024. Disponível em: <http://repositorio.ucm.ac.mz/handle/123456789/333>