

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MATO GROSSO DO SUL
UNIDADE UNIVERSITÁRIA DE CASSILÂNDIA
PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA E SUSTENTABILIDADE NA
AGRICULTURA

COINOCULAÇÃO DE BACTÉRIAS PROMOTORAS DE CRESCIMENTO
VEGETAL ASSOCIADAS À APLICAÇÃO DE SILTITO GLAUCONÍTICO NA
CULTURA DA SOJA EM SOLO ARENOSO

KARLA MIKAELA CARRIJO SILVA

CASSILÂNDIA

2026

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MATO GROSSO DO SUL
UNIDADE UNIVERSITÁRIA DE CASSILÂNDIA
PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA E SUSTENTABILIDADE NA
AGRICULTURA

COINOCULAÇÃO DE BACTÉRIAS PROMOTORAS DE CRESCIMENTO
VEGETAL ASSOCIADAS À APLICAÇÃO DE SILTITO GLAUCONÍTICO NA
CULTURA DA SOJA EM SOLO ARENOSO

KARLA MIKAELA CARRIJO SILVA

Orientador: Prof. Dr. Tiago Zoz

Co-orientador: Carlos Eduardo da Silva Oliveira

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia - Sustentabilidade na Agricultura, da Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Agronomia - Sustentabilidade na Agricultura.

CASSILÂNDIA

2026

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	8
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	12
2.1 Área experimental.....	12
2.2 Caracterização química e preparo do solo	12
2.3 Delineamento experimental e tratamentos.....	14
2.4 Inoculação e aplicação do silício	14
2.5 Implantação e condução da cultura	15
2.6 Avaliações	15
2.6.1 Nodulação	15
2.6.2 Trocas gasosas	16
2.6.3 Componentes de produção.....	16
2.6.4 Produtividade de grãos	16
2.6.5 Análise estatística	17
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	18
4. CONCLUSÃO.....	32
5. REFERÊNCIAS.....	33

LISTA DE FIGURAS

Gráfico 1 – Temperatura média do ar e precipitação pluvial mensal durante a condução do experimento em Cassilândia, MS, na safra 2024/2025.	18
Gráfico 2 – Número de nódulos (NOD) por planta de soja submetida a diferentes estratégias de inoculação e coinoculação associadas à adubação foliar com silício.	20
Gráfico 3 – Massa fresca de nódulos (MFNOD) por planta de soja submetida a diferentes estratégias de inoculação e coinoculação associadas à adubação foliar com silício.	21
Gráfico 4 – Massa seca de nódulos (MSNOD) por planta de soja submetida a diferentes estratégias de inoculação e coinoculação associadas à adubação foliar com silício.	21
Gráfico 5 – Número de vagens (NV) por planta de soja submetida a diferentes estratégias de inoculação e coinoculação associadas à adubação foliar com silício.	24
Gráfico 6 – Número de grãos (NG) por planta de soja submetida a diferentes estratégias de inoculação e coinoculação associadas à adubação foliar com silício.	25
Gráfico 7 – Produtividade de grãos (PROD) de plantas de soja submetidas a diferentes estratégias de inoculação e coinoculação associadas à adubação foliar com silício.	26
Gráfico 8 – Efeito da aplicação foliar de silício associada a diferentes estratégias de inoculação e coinoculação sobre a concentração intercelular de CO ₂ (Ci), a condutância estomática (gs), a taxa de transpiração (E), a taxa fotossintética líquida (A) e a eficiência do uso da água (EUA) em plantas de soja.	28
Gráfico 9 – Efeito da aplicação foliar de silício associada a diferentes estratégias de inoculação e coinoculação sobre a concentração intercelular de CO ₂ (Ci), a condutância estomática (gs) e a taxa fotossintética líquida (A) em plantas de soja.	29
Gráfico 10 – Efeito da aplicação foliar de silício associada a diferentes estratégias de inoculação e coinoculação sobre a taxa de transpiração (E) e a eficiência do uso da água (EUA) em plantas de soja.	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Caracterização química do solo da área experimental na camada de 0,00–0,20 m, antes da instalação do experimento. 13

Tabela 2 – Resumo da análise de variância para número de nódulos (NOD), massa fresca de nódulos (MFNOD) e massa seca de nódulos (MSNOD) de plantas de soja submetidas a diferentes estratégias de inoculação e coinoculação associadas à adubação foliar com silício. 19

Tabela 3 – Resumo da análise de variância para altura de plantas (AP), altura de inserção da primeira vagem (INS), número de vagens por planta (NV), número de grãos por planta (NG), massa de 100 grãos (M100) e produtividade de grãos (PROD) de plantas de soja submetidas a diferentes estratégias de inoculação e coinoculação associadas à adubação foliar com silício. 23

Tabela 4 – Resumo da análise de variância para concentração intercelular de CO₂ (Ci), taxa de transpiração (E), condutância estomática (gs), taxa fotossintética líquida (A) e eficiência do uso da água (EUA) de plantas de soja submetidas a diferentes estratégias de inoculação e coinoculação associadas à adubação foliar com silício. 28

RESUMO

A coinoculação de bactérias promotoras de crescimento de plantas, associada à adubação foliar com silício, pode promover alterações fisiológicas e agronômicas na soja cultivada em solos arenosos. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo avaliar os efeitos da interação entre diferentes estratégias de **inoculação e coinoculação** e a adubação foliar com silício sobre a nodulação, as trocas gasosas, os componentes de produção e a produtividade da soja. O experimento foi conduzido na Fazenda Experimental da Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, em Cassilândia, MS, em solo arenoso, utilizando a cultivar Dagma 7621 I2X. Adotou-se o delineamento em blocos casualizados, com quatro repetições, em esquema fatorial 2×4 , constituído por dois níveis de adubação foliar com silício (sem e com Si) e quatro estratégias de inoculação/coinoculação: *Bradyrhizobium* sp.; *Bradyrhizobium* sp. + *Bacillus aryabhattai*; *Bradyrhizobium* sp. + *Azospirillum brasilense*; e *Bradyrhizobium* sp. + *A. brasilense* + *B. aryabhattai*. A aplicação foliar de silício foi realizada no estágio V8, na dose de 20 kg ha^{-1} do produto à base de silito glauconítico. Na ausência de silício, a associação entre *Bradyrhizobium* sp. e *B. aryabhattai* proporcionou maior número de vagens e maior produtividade de grãos. Na presença de silício, a coinoculação com *Bradyrhizobium* sp. + *A. brasilense* promoveu maior número e massa seca de nódulos, enquanto as associações de *Bradyrhizobium* sp. + *A. brasilense* e *Bradyrhizobium* sp. + *B. aryabhattai* favoreceram o número de vagens e de grãos por planta. Os resultados demonstram que as respostas da soja às bactérias promotoras de crescimento dependem da combinação de microrganismos e da aplicação de silício. Embora o silício tenha favorecido características de nodulação e componentes de produção em determinadas coinoculações, o maior desempenho produtivo foi obtido com a coinoculação de *Bradyrhizobium* sp. + *Bacillus aryabhattai* associada à aplicação foliar de silício, evidenciando que os benefícios dessas práticas são dependentes da interação entre os tratamentos.

Palavras-chave: *Azospirillum brasilense*; *Bacillus aryabhattai*; *Bradyrhizobium* sp.; Cerrado; silício; solo arenoso.

ABSTRACT

Co-inoculation with plant growth-promoting bacteria combined with foliar silicon fertilization may induce physiological and agronomic changes in soybean grown in sandy soils. In this context, this study aimed to evaluate the effects of the interaction between different inoculation and co-inoculation strategies and foliar silicon fertilization on nodulation, gas exchange, yield components, and soybean grain yield. The experiment was conducted at the Experimental Farm of the State University of Mato Grosso do Sul, Cassilândia, Mato Grosso do Sul, Brazil, in sandy soil using the soybean cultivar Dagma 7621 I2X. A randomized complete block design with four replicates was used in a 2×4 factorial arrangement, consisting of two levels of foliar silicon fertilization (without and with Si) and four inoculation/co-inoculation strategies: *Bradyrhizobium* sp.; *Bradyrhizobium* sp. + *Bacillus aryabhattai*; *Bradyrhizobium* sp. + *Azospirillum brasilense*; and *Bradyrhizobium* sp. + *A. brasilense* + *B. aryabhattai*. Foliar silicon was applied at the V8 growth stage at a rate of 20 kg ha⁻¹ of a glauconitic siltstone-based product. In the absence of silicon, the association of *Bradyrhizobium* sp. with *B. aryabhattai* resulted in a greater number of pods and higher grain yield. In the presence of silicon, co-inoculation with *Bradyrhizobium* sp. + *A. brasilense* increased nodule number and dry mass, whereas the combinations of *Bradyrhizobium* sp. + *A. brasilense* and *Bradyrhizobium* sp. + *B. aryabhattai* favored the number of pods and grains per plant. The results demonstrate that soybean responses to plant growth-promoting bacteria depend on the microbial combination and silicon application. Although silicon favored nodulation traits and yield components under specific co-inoculation strategies, the highest grain yield was obtained with the co-inoculation of *Bradyrhizobium* sp. + *Bacillus aryabhattai* associated with foliar silicon application, indicating that the benefits of these practices depend on the interaction between treatments.

Keywords: *Azospirillum brasilense*; *Bacillus aryabhattai*; *Bradyrhizobium* sp.; Cerrado; silicon; sandy soil.

1. INTRODUÇÃO

A aplicação de bactérias promotoras de crescimento de plantas (BPCP) e a adubação com silício têm se destacado como estratégias de manejo capazes de modular o crescimento, a fisiologia e o desempenho produtivo da soja (*Glycine max* (L.) Merrill). Nessa cultura, a fixação biológica de nitrogênio (FBN), estabelecida principalmente pela simbiose com bactérias do gênero *Bradyrhizobium*, desempenha papel fundamental no suprimento de nitrogênio às plantas, reduzindo a dependência de fertilizantes nitrogenados e contribuindo para a sustentabilidade dos sistemas de produção. Entretanto, condições ambientais adversas, especialmente o déficit hídrico, podem comprometer processos metabólicos e a própria FBN, tornando relevante a adoção de estratégias que favoreçam o crescimento radicular, a aquisição de água e nutrientes e a manutenção da atividade fisiológica das plantas (FREITAS et al., 2022; SILVA et al., 2019).

Entre as BPCP utilizadas em associação com *Bradyrhizobium*, destaca-se *Azospirillum brasilense*, cuja ação promotora do crescimento está relacionada, entre outros mecanismos, à produção de fitormônios e à modulação do desenvolvimento do sistema radicular, favorecendo a formação de raízes laterais e pelos radiculares e ampliando o volume de solo explorado pelas plantas. Essas alterações podem favorecer a aquisição de água e nutrientes e contribuir para o crescimento vegetal. Em soja, a coinoculação de *A. brasilense* com *Bradyrhizobium* spp. pode promover incrementos no desenvolvimento radicular, na nodulação e na produtividade de grãos, embora a magnitude dessas respostas seja dependente das condições edafoclimáticas e de manejo, incluindo características relacionadas à textura do solo (SILVA et al., 2019; BARBOSA et al., 2021).

Bacillus aryabhattai, por sua vez, apresenta mecanismos de promoção do crescimento vegetal associados à produção e à modulação de fitormônios, à manutenção da disponibilidade de nutrientes e às respostas das plantas a condições ambientais adversas. Em soja, a inoculação com *B. aryabhattai* tem sido associada à produção de ácido indolacético, ácido abscísico, citocininas e giberelinas, bem como à modulação de respostas fisiológicas relacionadas ao comportamento estomático. Além disso, estudos demonstram que essa bactéria pode favorecer o crescimento e contribuir para a manutenção do estado nutricional e do conteúdo de clorofila das plantas. Esses mecanismos reforçam o potencial de *B. aryabhattai* como BPCP e justificam sua avaliação separadamente de *A. brasilense* em estratégias de coinoculação com *Bradyrhizobium* (PARK et al., 2017; MUN et al., 2024).

A disponibilidade hídrica assume particular importância em solos de textura arenosa, caracterizados por menor capacidade de retenção e armazenamento de água em comparação com solos de textura mais fina. Nessas condições, a redução da disponibilidade de água entre eventos de precipitação pode ocorrer rapidamente, submetendo as plantas a oscilações no suprimento hídrico e afetando processos fisiológicos associados às trocas gasosas e ao crescimento. Na soja, o déficit hídrico pode reduzir a atividade fotossintética e alterar o funcionamento estomático, além de comprometer a fixação biológica de nitrogênio. Nesse contexto, estratégias que favoreçam o desenvolvimento do sistema radicular e a exploração de maior volume de solo podem contribuir para a aquisição de água e nutrientes pelas plantas (SILVA et al., 2019; FREITAS et al., 2022; BARBOSA et al., 2021).

A utilização de BPCP constitui uma dessas estratégias, uma vez que diferentes microrganismos podem atuar sobre o desenvolvimento radicular, a produção de fitormônios, a aquisição de nutrientes e as respostas fisiológicas das plantas. Em condições de restrição hídrica, essas alterações podem contribuir para a manutenção do crescimento e da atividade metabólica. Entretanto, os efeitos promovidos pelas BPCP são dependentes da espécie e da estirpe bacteriana, da planta hospedeira e das condições edafoclimáticas, o que explica a variabilidade das respostas observadas para diferentes combinações de inoculação e coinoculação (SILVA et al., 2019; BARBOSA et al., 2021; MUN et al., 2024).

Além das estratégias de inoculação e coinoculação, o silício (Si) tem despertado interesse em razão de sua atuação sobre diferentes processos fisiológicos relacionados às respostas das plantas aos estresses ambientais. Embora não seja considerado elemento essencial para a maioria das espécies, sua suplementação pode contribuir para a manutenção do estado hídrico vegetal por meio de mecanismos relacionados à absorção e ao transporte de água, ao ajuste osmótico, à regulação do funcionamento estomático e das perdas de água por transpiração e à ativação do sistema antioxidante. Esses mecanismos podem favorecer a manutenção da integridade celular e da atividade fotossintética, particularmente em condições de déficit hídrico (MALIK et al., 2021; SAH et al., 2022).

A atuação do Si sobre as relações hídricas apresenta relação direta com as trocas gasosas das plantas, uma vez que alterações na abertura estomática influenciam simultaneamente a perda de água por transpiração e a entrada de CO₂ necessária à fotossíntese. Consequentemente, modificações no comportamento estomático podem refletir-se na condutância estomática, na taxa de transpiração, na concentração intercelular de CO₂, na taxa fotossintética e na eficiência

do uso da água. Em soja submetida à restrição hídrica, a suplementação com Si tem apresentado efeitos sobre essas características fisiológicas, evidenciando seu potencial para modular as relações entre assimilação de carbono e uso da água pela cultura (SAH et al., 2022; ABDULLAH et al., 2025).

A associação entre BPCP e Si apresenta, portanto, potencial para promover respostas complementares, uma vez que essas estratégias podem atuar por mecanismos distintos sobre o sistema radicular, a aquisição de água e nutrientes e a atividade fisiológica das plantas. Em soja, a coinoculação com rizobactérias pode modificar a absorção de nutrientes, as trocas gasosas e a produtividade, enquanto a associação entre microrganismos e fontes de Si pode interferir nos componentes de produção e no rendimento da cultura. Entretanto, essas respostas não são necessariamente aditivas e podem variar em função dos microrganismos utilizados, da disponibilidade de Si e das condições ambientais em que a cultura é conduzida (OLIVEIRA et al., 2025; SOUZA et al., 2025).

Apesar dos avanços obtidos com o uso isolado da inoculação, da coinoculação e da aplicação de Si, ainda são limitadas as informações sobre a interação entre essas estratégias na cultura da soja, particularmente em solos arenosos. As respostas à coinoculação podem variar em função das condições ambientais, da combinação de microrganismos e das características do solo, enquanto os efeitos fisiológicos do Si também dependem do estado hídrico e das condições de crescimento das plantas. Assim, torna-se relevante compreender como diferentes combinações envolvendo *Bradyrhizobium* sp., *A. brasilense* e *B. aryabhatai* interagem com a aplicação foliar de Si e como essas respostas se refletem simultaneamente na nodulação, nas trocas gasosas, nos componentes de produção e na produtividade de grãos (BARBOSA et al., 2021; MALIK et al., 2021; SOUZA et al., 2025).

Diante desse contexto, considerando que a coinoculação com BPCP pode modificar características relacionadas ao desenvolvimento radicular, à nodulação e à fisiologia da soja e que o Si pode atuar sobre as relações hídricas e as trocas gasosas das plantas, parte-se da hipótese de que diferentes estratégias de inoculação e coinoculação envolvendo *Bradyrhizobium* sp., *Azospirillum brasilense* e *Bacillus aryabhatai*, associadas à adubação foliar com silício, modulam de maneira distinta a nodulação, as trocas gasosas, os componentes de produção e a produtividade de grãos da soja cultivada em solo arenoso (SILVA et al., 2019; BARBOSA et al., 2021; MALIK et al., 2021). Assim, o presente estudo teve como objetivo avaliar os efeitos da interação entre a adubação foliar com silício e diferentes combinações de inoculação e

coinoculação com bactérias promotoras de crescimento de plantas sobre a nodulação, as trocas gasosas, os componentes de produção e a produtividade de grãos da soja cultivada em solo arenoso.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área experimental

O experimento foi conduzido durante a safra 2024/2025 na Estação Experimental da Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS), Unidade Universitária de Cassilândia, localizada no município de Cassilândia, Mato Grosso do Sul, Brasil (19°05'29" S, 51°48'49" O; altitude de 510 m).

O clima da região é classificado como Aw, segundo Köppen-Geiger, caracterizado por verão quente e chuvoso e inverno seco. A precipitação média anual é de aproximadamente 1.435 mm, concentrando-se predominantemente entre outubro e abril, enquanto o período de menor precipitação ocorre entre maio e setembro. As temperaturas são mais amenas durante o inverno e mais elevadas nos meses de verão.

2.2 Caracterização química e preparo do solo

A área experimental está estabelecida sobre Latossolo Vermelho de textura arenosa. Antes da instalação do experimento, foram coletadas amostras compostas de solo na camada de 0,00–0,20 m para a caracterização química da área experimental. As análises foram realizadas conforme a metodologia descrita por Raij et al. (2001), e os resultados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Caracterização química do solo da área experimental na camada de 0,00–0,20 m, antes da instalação do experimento.

Atributo	Unidade	Valor
pH (H ₂ O)	—	4,9
P (resina)	mg dm ⁻³	3,0
K	mmolc dm ⁻³	0,9
Ca	mmolc dm ⁻³	8,0
Mg	mmolc dm ⁻³	4,0
Al ³⁺	mmolc dm ⁻³	2,0
H + Al	mmolc dm ⁻³	18,0
Soma de bases (SB)	mmolc dm ⁻³	12,9
Capacidade de troca catiônica (CTC)	mmolc dm ⁻³	30,9
Saturação por bases (V)	%	42,0
Saturação por alumínio (m)	%	13,0
Matéria orgânica (MO)	g dm ⁻³	19,0
S-SO ₄	mg dm ⁻³	2,0
B	mg dm ⁻³	0,2
Cu	mg dm ⁻³	0,8
Fe	mg dm ⁻³	22,0
Mn	mg dm ⁻³	9,7
Zn	mg dm ⁻³	0,4

Nota: SB = soma de bases; CTC = capacidade de troca catiônica; V = saturação de bases; m = saturação por alumínio; MO = matéria orgânica.

Com base nos resultados da análise química, realizou-se a calagem para elevar a saturação por bases a 70%, utilizando calcário calcítico com Poder Relativo de Neutralização Total (PRNT) de 85%. Após a aplicação do corretivo, foram realizadas uma gradagem pesada e uma gradagem niveladora para incorporação do calcário na camada de 0,00–0,20 m.

Posteriormente, foi realizada a fosfatagem corretiva com aplicação de 100 kg ha⁻¹ de P₂O₅, utilizando superfosfato triplo como fonte.

Na semeadura, foram aplicados 80 kg ha⁻¹ de P₂O₅ na forma de superfosfato simples (18% de P₂O₅, 16% de Ca e 10% de S). A adubação potássica foi realizada mediante aplicação de 30 kg ha⁻¹ de K₂O a lanço, utilizando cloreto de potássio como fonte, complementada por duas adubações de cobertura nos estádios V4 e V6, com aplicação de 35 kg ha⁻¹ de K₂O em cada estádio, conforme as recomendações de Cantarella et al. (2022).

2.3 Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados, com quatro repetições, em esquema fatorial 2×4 , totalizando oito tratamentos. O primeiro fator foi constituído por dois níveis de adubação foliar com silício: ausência de silício, com pulverização de água, e aplicação de silito glauconítico. O segundo fator foi constituído por quatro estratégias de inoculação e coinoculação: i) *Bradyrhizobium* sp.; ii) *Bradyrhizobium* sp. + *Bacillus aryabhattai*; iii) *Bradyrhizobium* sp. + *Azospirillum brasilense*; e iv) *Bradyrhizobium* sp. + *B. aryabhattai* + *A. brasilense*.

Cada parcela experimental foi constituída por cinco linhas de cultivo com 5 m de comprimento, espaçadas em 0,50 m, totalizando 12,5 m². A área útil de cada parcela correspondeu a 6,0 m². Para a determinação da produtividade de grãos, foi considerada uma subárea de 4,0 m², constituída pelos quatro metros centrais das duas linhas úteis, desconsiderando-se 0,50 m de cada extremidade e as linhas laterais como bordadura.

2.4 Inoculação e aplicação do silício

Todas as sementes foram inoculadas com inoculante comercial líquido à base de *Bradyrhizobium* sp., composto pelas estirpes *Bradyrhizobium japonicum* SEMIA 5079 e *Bradyrhizobium diazoefficiens* SEMIA 5080, na concentração de 5×10^9 unidades formadoras de colônia (UFC) mL⁻¹, na dose de 100 mL do produto para cada 50 kg de sementes. A inoculação foi realizada em sacos plásticos sem perfurações, nos quais o inoculante foi adicionado às sementes e homogeneizado manualmente até a obtenção de cobertura uniforme. A semeadura foi realizada imediatamente após o tratamento.

Nos tratamentos de coinoculação, foram utilizados inoculantes comerciais contendo *Bacillus aryabhattai* (estirpe CCT 8087) e *Azospirillum brasilense* (estirpes Ab-V5 e Ab-V6), ambos na concentração de 2×10^8 UFC mL⁻¹ e na dose de 100 mL para cada 50 kg de sementes, conforme as respectivas combinações estabelecidas nos tratamentos experimentais. Os inoculantes foram aplicados via tratamento de sementes, seguindo o mesmo procedimento de homogeneização utilizado para *Bradyrhizobium* sp.

A aplicação foliar de silício foi realizada no estágio fenológico V8, utilizando o produto comercial K-Fort® à base de silito glauconítico, contendo 25% de Si e 10% de K₂O. O produto

foi aplicado na dose de 20 kg ha⁻¹, utilizando volume de calda de 300 L ha⁻¹, por meio de pulverizador manual costal. Nos tratamentos sem aplicação de silício, foi realizada pulverização com água, utilizando o mesmo volume de calda.

2.5 Implantação e condução da cultura

A semeadura foi realizada em 9 de dezembro de 2024, utilizando a cultivar de soja Dagma 7621 I2X, pertencente ao grupo de maturidade relativa 7.6, de hábito de crescimento indeterminado e portadora da biotecnologia Intacta 2 Xtend®, conforme informações do obtentor da cultivar (DAGMA, 2025). A população final foi estabelecida em aproximadamente 220.000 plantas ha⁻¹.

Os tratos culturais foram realizados de acordo com as recomendações técnicas para a cultura da soja, contemplando o manejo de plantas daninhas, pragas e doenças, de modo a minimizar interferências desses fatores sobre o desenvolvimento das plantas durante a condução do experimento.

A colheita foi realizada manualmente em 12 de abril de 2025, quando as plantas atingiram o estágio fenológico R9, correspondente à maturidade plena, considerando-se a área previamente estabelecida para cada avaliação.

2.6 Avaliações

2.6.1 Nodulação

A avaliação da nodulação foi realizada durante os estádios reprodutivos R1–R2, em 24 de janeiro de 2025. Para cada parcela, foram coletadas aleatoriamente cinco plantas da área útil, com auxílio de pá reta, preservando-se a integridade do sistema radicular. As raízes foram acondicionadas em sacos plásticos e encaminhadas ao laboratório, onde foram cuidadosamente lavadas em água corrente sobre peneira com malha de 1 mm, a fim de evitar perdas de nódulos.

Após a lavagem, determinou-se o número de nódulos por planta (NOD). Em seguida, os nódulos foram destacados das raízes e pesados para determinação da massa fresca de nódulos (MFNOD). Posteriormente, foram acondicionados em sacos de papel e submetidos à secagem em estufa com circulação forçada de ar a 65 °C, durante 72 horas, para determinação da massa seca de nódulos (MSNOD), utilizando-se balança semianalítica com precisão de 0,01 g. Os valores de cada parcela corresponderam à média das cinco plantas avaliadas.

2.6.2 Trocas gasosas

As trocas gasosas foliares foram avaliadas durante os estádios reprodutivos R1–R2, em 24 de janeiro de 2025, utilizando-se um analisador portátil de gases por infravermelho (Infrared Gas Analyzer – IRGA), modelo LCI (ADC BioScientific, Hertfordshire, Reino Unido). As avaliações foram realizadas entre 9h e 10h, sob condições de céu aberto, em oito plantas selecionadas aleatoriamente na área útil de cada parcela. Durante as avaliações, a radiação fotossinteticamente ativa (PAR) variou entre 1.100 e 1.200 $\mu\text{mol f\acute{o}tons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

Foram determinadas a concentração intercelular de CO_2 (C_i ; $\mu\text{mol mol}^{-1}$), a condutância estomática (g_s ; $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), a taxa de transpiração (E ; $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), a taxa fotossintética líquida (A ; $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e a eficiência do uso da água (EUA; $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$).

2.6.3 Componentes de produção

Os componentes de produção foram avaliados por ocasião da colheita, quando as plantas atingiram o estágio fenológico R9, correspondente à maturidade plena. Para essa avaliação, foram coletadas aleatoriamente cinco plantas da área útil de cada parcela, nas quais foram determinadas a altura de plantas (cm), a altura de inserção da primeira vagem (cm), o número de vagens por planta e o número de grãos por planta.

A massa de 100 grãos (g) foi determinada a partir de uma amostra de 100 sementes obtida após a trilha dos grãos colhidos na área útil de cada parcela, sendo os valores corrigidos para 13% de umidade.

2.6.4 Produtividade de grãos

A produtividade de grãos foi determinada a partir da colheita de uma subárea de 4,0 m^2 de cada parcela experimental, correspondente aos quatro metros centrais das duas linhas centrais. Após a colheita manual, o material colhido foi identificado e submetido à trilha mecânica para obtenção da massa de grãos. A produtividade foi expressa em kg ha^{-1} , com os valores corrigidos para 13% de umidade.

2.6.5 Análise estatística

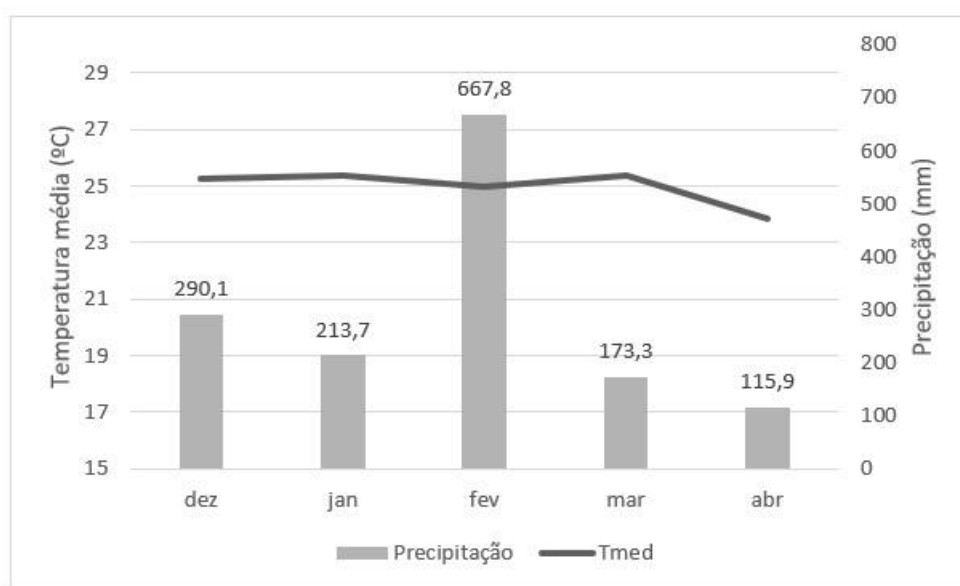
Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA), considerando-se o delineamento experimental em blocos casualizados, em esquema fatorial 2×4 . A significância dos efeitos dos fatores e da interação entre eles foi avaliada pelo teste F, a 5% de probabilidade ($p \leq 0,05$). Quando constatado efeito significativo, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. As análises estatísticas foram realizadas utilizando o programa SISVAR, versão 5.6 (FERREIRA, 2019).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante a condução do experimento, a precipitação acumulada entre dezembro de 2024 e abril de 2025 foi de 1.460,8 mm, com maior volume registrado em fevereiro, quando a precipitação mensal atingiu 667,8 mm (Gráfico 1). O elevado volume de precipitação observado durante o ciclo da cultura indica que as plantas foram conduzidas sob elevada disponibilidade hídrica.

Essa condição deve ser considerada na interpretação das respostas à aplicação foliar de silício, uma vez que a elevada disponibilidade de água pode reduzir a magnitude de respostas associadas à atuação do Si na mitigação de condições de déficit hídrico. Nesse contexto, o regime pluviométrico observado durante a safra pode ter contribuído para atenuar alguns dos efeitos da aplicação foliar de silício sobre as variáveis fisiológicas avaliadas.

Gráfico 1 – Temperatura média do ar e precipitação pluvial mensal durante a condução do experimento em Cassilândia, MS, na safra 2024/2025.



Fonte: Estação Meteorológica da Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS), Unidade Universitária de Cassilândia (2025).

Nota: As barras representam a precipitação pluvial mensal acumulada (mm) e a linha representa a temperatura média mensal do ar (°C) durante o período experimental. A precipitação acumulada entre dezembro de 2024 e abril de 2025 foi de 1.460,8 mm, com maior precipitação mensal registrada em fevereiro (667,8 mm).

Houve interação significativa ($p \leq 0,05$) entre a adubação foliar com silício e as estratégias de inoculação e coinoculação para o número de nódulos (NOD), a massa fresca de nódulos (MFNOD) e a massa seca de nódulos (MSNOD) de plantas de soja (Tabela 2).

Tabela 2 – Resumo da análise de variância para número de nódulos (NOD), massa fresca de nódulos (MFNOD) e massa seca de nódulos (MSNOD) de plantas de soja submetidas a diferentes estratégias de inoculação e coinoculação associadas à adubação foliar com silício.

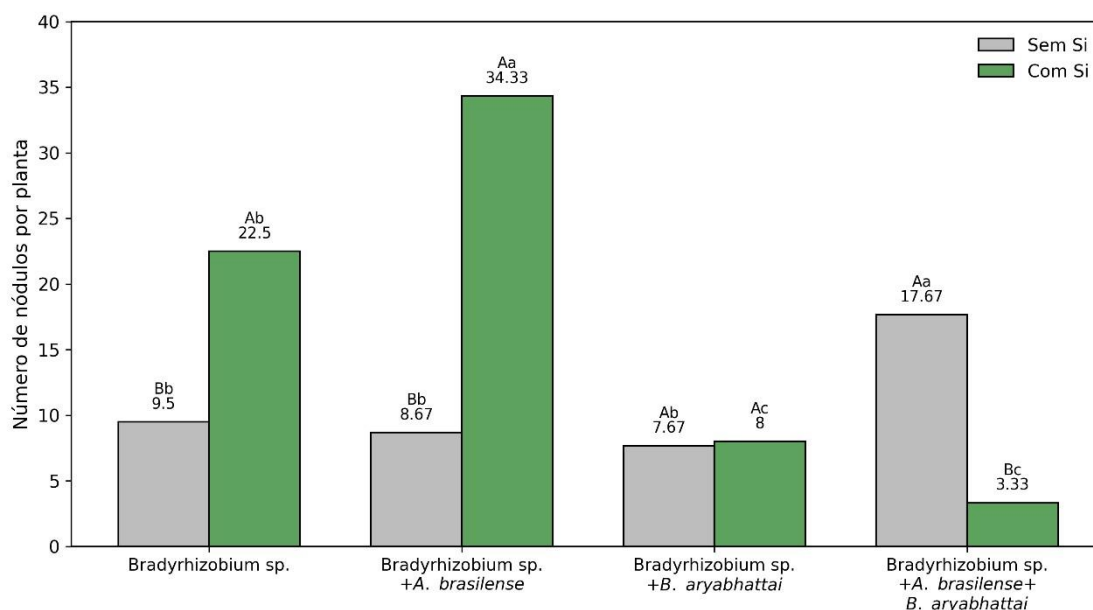
FV	NOD	MFNOD	MSNOD
Bloco	0,808ns	0,488ns	0,490ns
Silício (Si)	0,000**	0,000**	0,035*
Coinoculação (C)	0,005**	0,000**	0,000**
Si*C	0,000*	0,000**	0,000**
Erro±	1,41	0,09	0,04
CV (%)	17,52	16,43	28,58

ns = não significativo; * e ** = significativos a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F; CV = coeficiente de variação; FV = fonte de variação.

A interação significativa entre os fatores indica que a resposta da nodulação da soja à adubação foliar com silício depende da estratégia de inoculação ou coinoculação utilizada. Dessa forma, a interação foi desdobrada para comparação das médias.

Na ausência de aplicação foliar de silício, a coinoculação de *Bradyrhizobium* sp. + *A. brasilense* + *B. aryabhattai* proporcionou o maior número de nódulos por planta entre as estratégias avaliadas (Gráfico 2).

Gráfico 2 – Número de nódulos (NOD) por planta de soja submetida a diferentes estratégias de inoculação e coinoculação associadas à adubação foliar com silício.

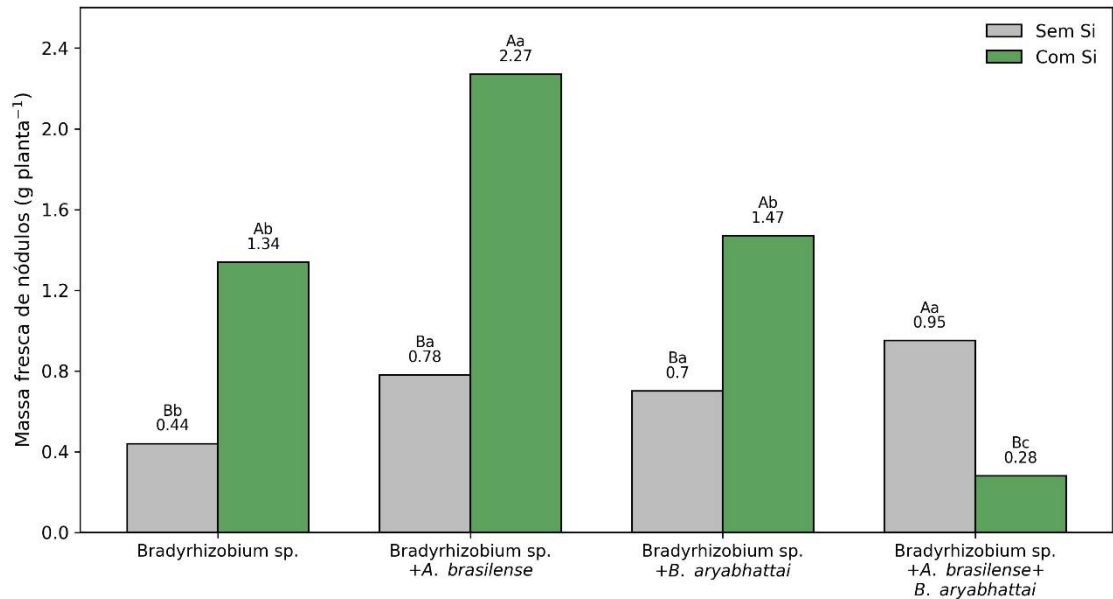


Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Nota: Barras cinzas representam a ausência de aplicação de silício (Sem Si) e barras verdes representam a aplicação foliar de silício (Com Si). Letras minúsculas distintas indicam diferenças entre as coinoculações dentro de cada condição de silício, enquanto letras maiúsculas distintas indicam diferenças entre as condições de silício dentro de cada coinoculação, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Na presença de silício, a coinoculação de *Bradyrhizobium* sp. + *A. brasilense* promoveu maior nodulação, resultando no maior número de nódulos entre as estratégias avaliadas (Gráfico 2).

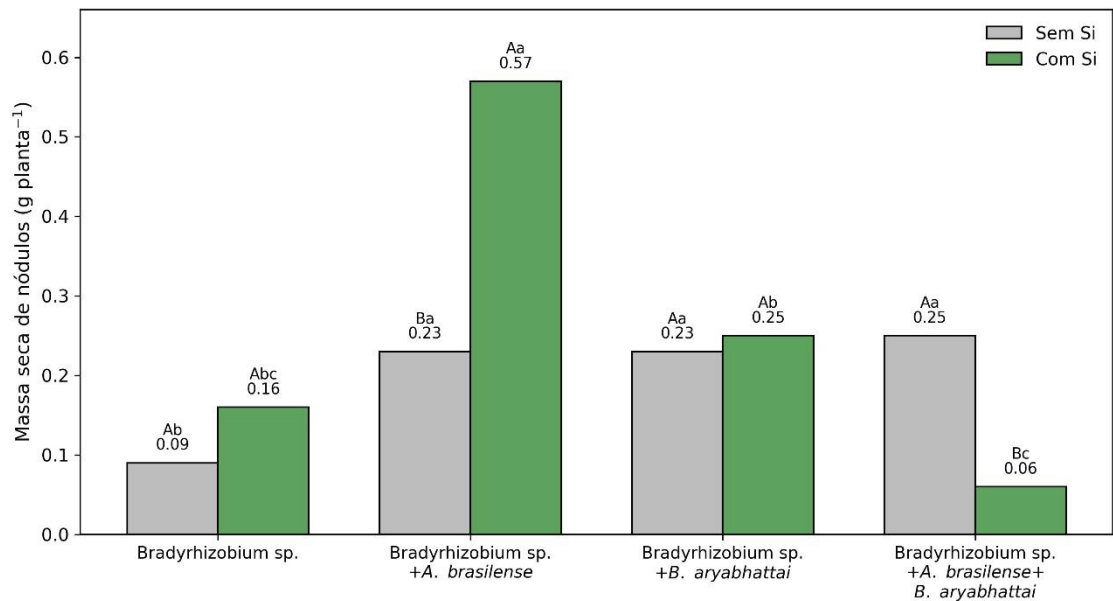
Gráfico 3 – Massa fresca de nódulos (MFNOD) por planta de soja submetida a diferentes estratégias de inoculação e coinoculação associadas à adubação foliar com silício.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Nota: Barras cinzas representam a ausência de aplicação de silício (Sem Si) e barras verdes representam a aplicação foliar de silício (Com Si). Letras minúsculas distintas indicam diferenças entre as coinoculações dentro de cada condição de silício, enquanto letras maiúsculas distintas indicam diferenças entre as condições de silício dentro de cada coinoculação, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Gráfico 4 – Massa seca de nódulos (MSNOD) por planta de soja submetida a diferentes estratégias de inoculação e coinoculação associadas à adubação foliar com silício.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Nota: Barras cinzas representam a ausência de aplicação de silício (Sem Si) e barras verdes representam a aplicação foliar de silício (Com Si). Letras minúsculas distintas indicam diferenças entre as coinoculações dentro de cada condição de silício, enquanto letras maiúsculas distintas indicam diferenças entre as condições de silício dentro de cada coinoculação, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Para a massa fresca e a massa seca de nódulos, as respostas também dependeram da interação entre a aplicação de silício e as estratégias de inoculação e coinoculação (Gráficos 3 e 4). Entre as combinações avaliadas, a associação de *Bradyrhizobium* sp. + *A. brasilense* apresentou resposta favorável à aplicação de silício, acompanhando o comportamento observado para o número de nódulos.

Em contraste, a coinoculação simultânea de *Bradyrhizobium* sp. + *A. brasilense* + *B. aryabhattai* apresentou redução no número e na biomassa de nódulos na presença de silício. Esse resultado demonstra que a resposta à aplicação foliar de silício depende da composição microbiana utilizada e que a associação de maior número de microrganismos não implicou, nas condições deste estudo, resposta superior de nodulação.

O incremento da nodulação observado com a coinoculação de *A. brasilense*, especialmente na presença da aplicação foliar de silício, pode estar relacionado aos mecanismos de promoção do crescimento associados a essa bactéria. A produção de fitormônios por bactérias promotoras de crescimento pode favorecer o desenvolvimento do sistema radicular, incluindo a formação de raízes laterais e pelos radiculares, ampliando os sítios de interação entre os rizóbios e a planta hospedeira e contribuindo para o estabelecimento da nodulação (BARBOSA et al., 2021).

O maior desenvolvimento do sistema radicular pode ampliar a superfície de contato entre as raízes e os microrganismos presentes na rizosfera, favorecendo a colonização por *Bradyrhizobium* e, conseqüentemente, o estabelecimento da nodulação e da fixação biológica de nitrogênio (OLIVEIRA et al., 2025). Além disso, efeitos do silício sobre o crescimento e a arquitetura do sistema radicular têm sido relatados na literatura, podendo favorecer condições para o estabelecimento de associações simbióticas (STEINER et al., 2018).

Além dos efeitos relacionados ao desenvolvimento radicular, a literatura indica que o silício pode estar envolvido em mecanismos associados à sinalização da nodulação, incluindo alterações na biossíntese de flavonoides pelas raízes. Esses compostos atuam como moléculas sinalizadoras na interação entre leguminosas e rizóbios, participando da indução de genes *nod* e do processo de estabelecimento da simbiose (TRIPATHI et al., 2021). Embora esses

mecanismos não tenham sido avaliados diretamente no presente estudo, eles podem contribuir para explicar a resposta de nodulação observada na associação entre *Bradyrhizobium* sp. + *A. brasilense* na presença de silício.

Houve interação significativa ($p \leq 0,01$) entre a aplicação foliar de silício e as estratégias de inoculação e coinoculação para o número de vagens por planta, o número de grãos por planta e a produtividade de grãos (Tabela 3).

Tabela 3 – Resumo da análise de variância para altura de plantas (AP), altura de inserção da primeira vagem (INS), número de vagens por planta (NV), número de grãos por planta (NG), massa de 100 grãos (M100) e produtividade de grãos (PROD) de plantas de soja submetidas a diferentes estratégias de inoculação e coinoculação associadas à adubação

	foliar		com		silício.	
FV	AP	INS	NV	NG	M100	PROD
	(cm)		(Nº planta ⁻¹)		g	(kg ha ⁻¹)
Bloco	0,842ns	0,149ns	0,099ns	0,117ns	0,031*	0,794ns
Silício (Si)	0,336ns	0,899ns	0,000**	0,000**	0,140ns	0,001**
Coinoculação (C)	0,205ns	0,076ns	0,000**	0,001**	0,068ns	0,003**
Si*C	0,151ns	0,2796ns	0,001**	0,001**	0,288ns	0,000**
Erro±	2,01	1,47	3,65	6,22	2,45	109,76
CV (%)	5,17	22,18	10,53	11,26	9,89	12,28

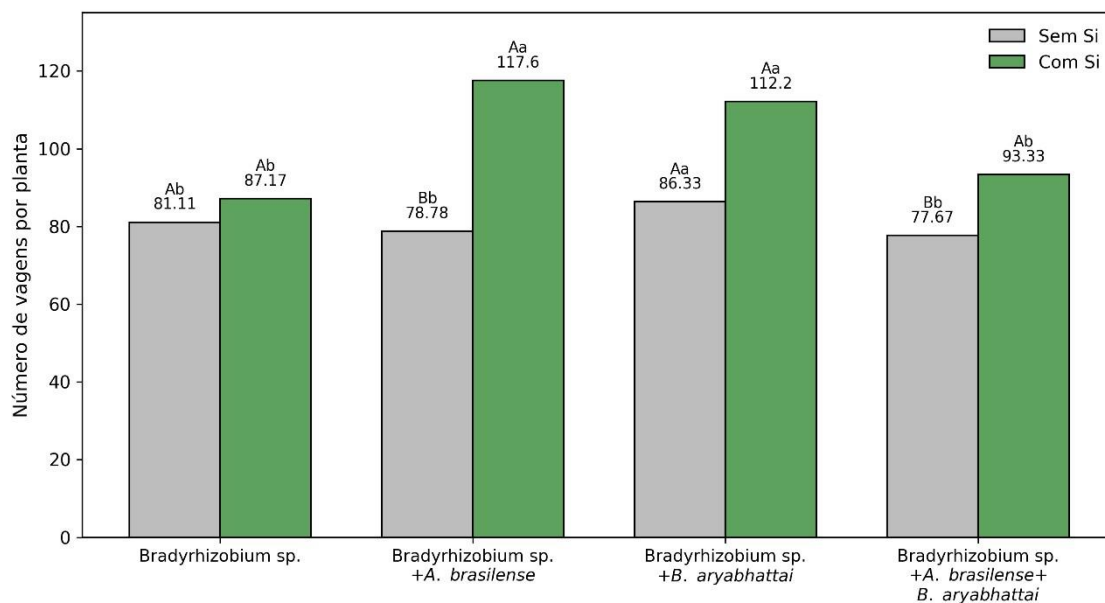
ns = não significativo; * e ** = significativos a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F; CV = coeficiente de variação; FV = fonte de variação.

Não houve efeito significativo ($p > 0,05$) da aplicação foliar de silício, das estratégias de inoculação e coinoculação ou da interação entre esses fatores para a altura de plantas, a altura de inserção da primeira vagem e a massa de 100 grãos (Tabela 3).

Para o número de vagens por planta, o número de grãos por planta e a produtividade de grãos, a interação significativa entre os fatores indica que a resposta à aplicação foliar de silício depende da estratégia de inoculação ou coinoculação utilizada. Dessa forma, a interação foi desdobrada para comparação das médias.

Na ausência de silício, a coinoculação de *Bradyrhizobium* sp. + *B. aryabhattai* proporcionou o maior número de vagens por planta em relação aos demais tratamentos (Gráfico 5).

Gráfico 5 – Número de vagens (NV) por planta de soja submetida a diferentes estratégias de inoculação e coinoculação associadas à adubação foliar com silício.

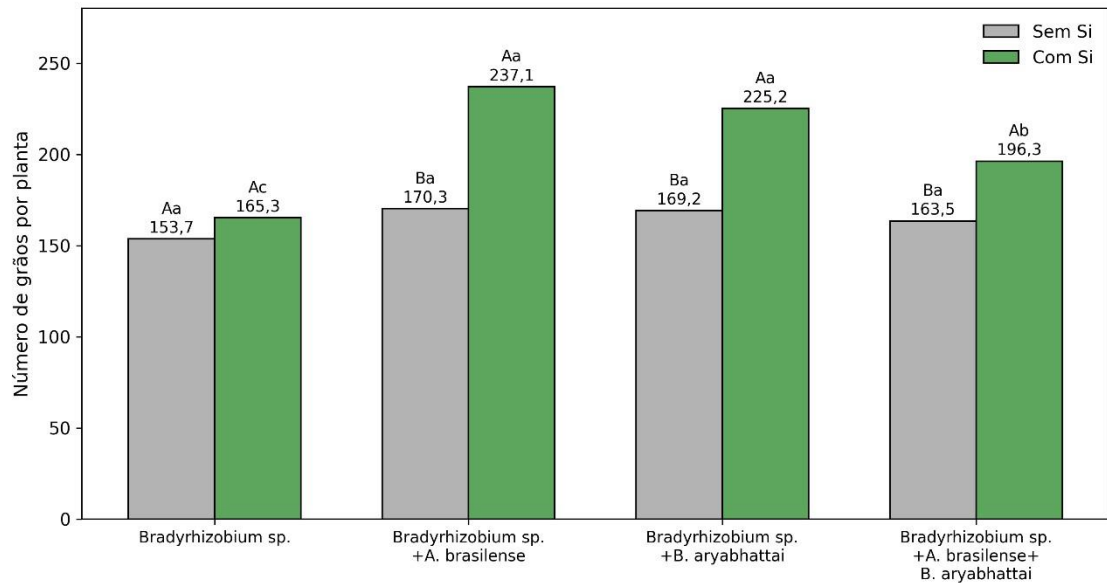


Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Nota: Barras cinzas representam a ausência de aplicação de silício (Sem Si) e barras verdes representam a aplicação foliar de silício (Com Si). Letras minúsculas distintas indicam diferenças entre as coinoculações dentro de cada condição de silício, enquanto letras maiúsculas distintas indicam diferenças entre as condições de silício dentro de cada coinoculação, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Entretanto, sob aplicação foliar de silício, as coinoculações com *Bradyrhizobium* sp. + *A. brasilense* e *Bradyrhizobium* sp. + *B. aryabhattai* apresentaram os maiores valores para número de vagens (Gráfico 5) e número de grãos por planta (Gráfico 6).

Gráfico 6 – Número de grãos (NG) por planta de soja submetida a diferentes estratégias de inoculação e coinoculação associadas à adubação foliar com silício.

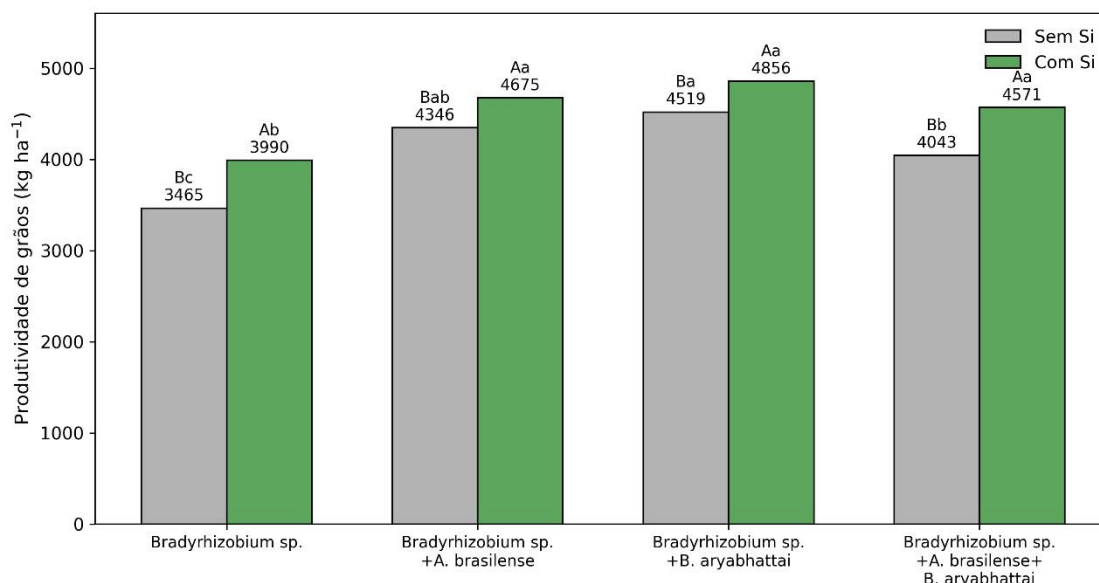


Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Nota: Barras cinzas representam a ausência de aplicação de silício (Sem Si) e barras verdes representam a aplicação foliar de silício (Com Si). Letras minúsculas distintas indicam diferenças entre as coinoculações dentro de cada condição de silício, enquanto letras maiúsculas distintas indicam diferenças entre as condições de silício dentro de cada coinoculação, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Para a produtividade de grãos, na presença de silício, as estratégias de coinoculação apresentaram valores superiores à inoculação isolada com *Bradyrhizobium* sp. Na ausência de silício, a coinoculação de *Bradyrhizobium* sp. + *B. aryabhattai* apresentou a maior produtividade, correspondendo a um incremento de 30,4% em relação à inoculação isolada com *Bradyrhizobium* sp. Além disso, no tratamento com inoculação isolada de *Bradyrhizobium* sp., a aplicação foliar de silício resultou em produtividade 15,2% superior à condição sem aplicação de silício (Gráfico 7).

Gráfico 7 – Produtividade de grãos (PROD) de plantas de soja submetidas a diferentes estratégias de inoculação e coinoculação associadas à adubação foliar com silício.



Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Nota: Barras cinzas representam a ausência de aplicação de silício (Sem Si) e barras verdes representam a aplicação foliar de silício (Com Si). Letras minúsculas distintas indicam diferenças entre as coinoculações dentro de cada condição de silício, enquanto letras maiúsculas distintas indicam diferenças entre as condições de silício dentro de cada coinoculação, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Os resultados demonstram que a resposta produtiva da soja à aplicação foliar de silício foi dependente da estratégia de inoculação ou coinoculação utilizada. A maior produtividade de grãos foi observada na coinoculação de *Bradyrhizobium* sp. + *B. aryabhattai* associada à aplicação foliar de silício. Além disso, a aplicação de Si promoveu aumento da produtividade dentro das estratégias de inoculação e coinoculação avaliadas, embora a magnitude dessa resposta tenha variado entre as combinações microbianas.

O desempenho produtivo observado nos tratamentos contendo *A. brasilense* pode estar relacionado aos mecanismos de promoção do crescimento associados a essa bactéria, incluindo o estímulo ao desenvolvimento do sistema radicular. Além disso, o aumento da nodulação observado em determinadas combinações pode favorecer o estabelecimento da simbiose com *Bradyrhizobium* sp. A literatura indica que esses mecanismos podem contribuir para a nutrição nitrogenada e para o suprimento de fotoassimilados às estruturas reprodutivas da cultura (OLIVEIRA et al., 2025).

Além dos efeitos associados às bactérias promotoras de crescimento, a literatura relata que o silício pode contribuir para a manutenção da atividade fisiológica das plantas,

especialmente sob condições de deficiência hídrica, por meio de efeitos sobre a atividade fotossintética, a transpiração e o funcionamento estomático. Esses mecanismos podem favorecer a disponibilidade de fotoassimilados para o desenvolvimento das estruturas reprodutivas e, conseqüentemente, influenciar a formação de vagens e grãos (MALIK et al., 2021; SAH et al., 2022). No presente estudo, entretanto, esses efeitos devem ser interpretados considerando a elevada disponibilidade hídrica registrada durante o ciclo da cultura.

O desempenho da coinoculação com *B. aryabhattai*, principalmente na ausência da aplicação foliar de silício, evidencia o potencial dessa associação para favorecer componentes relacionados ao rendimento da soja. Estudos relatam que bactérias promotoras de crescimento podem atuar por diferentes mecanismos, incluindo estímulo ao desenvolvimento radicular, aumento da disponibilidade e absorção de nutrientes, produção de fitormônios e modulação de respostas antioxidantes (STEINER et al., 2020; DEVI et al., 2021; MUN et al., 2024). Embora esses mecanismos não tenham sido avaliados diretamente no presente estudo, eles podem contribuir para explicar a resposta produtiva observada na coinoculação de *Bradyrhizobium* sp. + *B. aryabhattai*.

Sob o ponto de vista agrônômico, os resultados demonstram que as respostas da soja foram dependentes da combinação entre as estratégias de inoculação ou coinoculação e a aplicação foliar de silício. Embora a aplicação foliar de Si tenha promovido aumento da produtividade nas diferentes estratégias avaliadas, a magnitude da resposta variou entre as combinações microbianas, sendo o maior desempenho produtivo observado com *Bradyrhizobium* sp. + *B. aryabhattai* na presença de silício, evidenciando a importância da interação entre os fatores na definição da resposta da cultura.

Em conjunto, os resultados indicam que as diferenças observadas na produtividade foram acompanhadas principalmente por alterações no número de vagens e de grãos por planta, enquanto a altura de plantas, a altura de inserção da primeira vagem e a massa de 100 grãos não apresentaram resposta significativa aos tratamentos. Dessa forma, os efeitos observados sobre a produtividade estiveram associados principalmente aos componentes relacionados à formação de vagens e grãos.

Houve interação significativa ($p \leq 0,01$) entre a aplicação foliar de silício e as estratégias de inoculação e coinoculação para a concentração intercelular de CO_2 (Ci), a condutância estomática (gs) e a eficiência do uso da água (EUA). Para a taxa de transpiração (E) e a taxa fotossintética líquida (A), também foi observada interação significativa entre os fatores ($p \leq 0,05$) (Tabela 4).

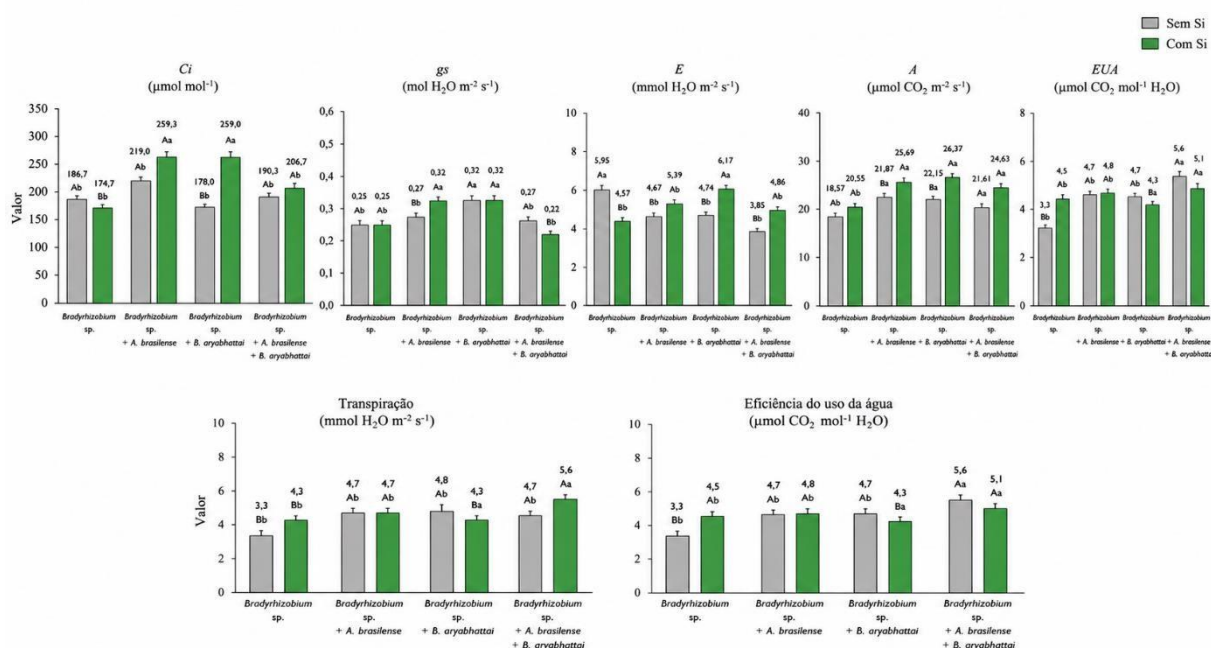
Tabela 4 – Resumo da análise de variância para concentração intercelular de CO₂ (Ci), taxa de transpiração (E), condutância estomática (gs), taxa fotossintética líquida (A) e eficiência do uso da água (EUA) em plantas de soja submetidas a diferentes estratégias de inoculação e coinoculação associadas à adubação foliar com silício.

FV	<i>Ci</i>	<i>E</i>	<i>gs</i>	<i>A</i>	<i>EUA</i>
Bloco	0,345ns	0,502ns	0,847ns	0,092ns	0,107ns
Silício (Si)	0,000**	0,000**	0,120ns	0,003**	0,000**
Coinoculação (C)	0,000**	0,000**	0,001**	0,014*	0,007**
Si*C	0,000**	0,023*	0,001**	0,047*	0,005**
Erro±	5,76	0,11	0,009	1,18	0,30
CV (%)	5,77	3,86	6,27	10,97	11,03

FV = fonte de variação; CV = coeficiente de variação; ns = não significativo; * e ** = significativos a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

A interação significativa entre os fatores indica que as respostas fisiológicas das plantas de soja à aplicação foliar de silício dependeram da estratégia de inoculação ou coinoculação utilizada. Dessa forma, a interação foi desdobrada para comparação das médias das variáveis fisiológicas (Gráfico 8).

Gráfico 8 – Efeito da aplicação foliar de silício associada a diferentes estratégias de inoculação e coinoculação sobre a concentração intercelular de CO₂ (Ci), a condutância estomática (gs), a taxa de transpiração (E), a taxa fotossintética líquida (A) e a eficiência do uso da água (EUA) em plantas de soja.



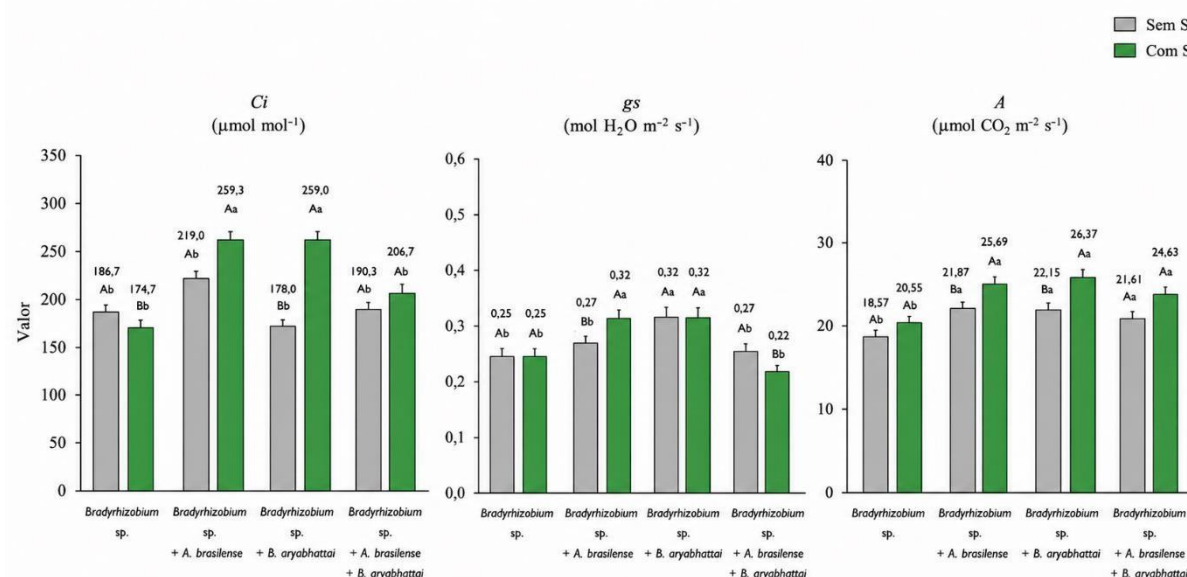
Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Nota: Barras cinzas representam a ausência de aplicação de silício (Sem Si) e barras verdes representam a aplicação foliar de silício (Com Si). Letras minúsculas distintas indicam diferenças entre as coinoculações dentro de cada

condição de silício, enquanto letras maiúsculas distintas indicam diferenças entre as condições de silício dentro de cada coinoculação, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Na ausência de aplicação foliar de silício, as estratégias de inoculação e coinoculação apresentaram respostas distintas para as variáveis fisiológicas avaliadas. Para a concentração intercelular de CO₂ (Ci), a coinoculação com *Bradyrhizobium* sp. + *A. brasilense* apresentou valor superior ao observado com *Bradyrhizobium* sp. + *B. aryabhattai*. Para a condutância estomática (gs) e a taxa fotossintética líquida (A), as diferenças entre as estratégias foram menos pronunciadas. Na presença de silício, destacaram-se as coinoculações de *Bradyrhizobium* sp. + *A. brasilense* e *Bradyrhizobium* sp. + *B. aryabhattai*, que apresentaram maiores valores de Ci, gs e A (Gráfico 9).

Gráfico 9 – Efeito da aplicação foliar de silício associada a diferentes estratégias de inoculação e coinoculação sobre a concentração intercelular de CO₂ (Ci), a condutância estomática (gs) e a taxa fotossintética líquida (A) em plantas de soja.



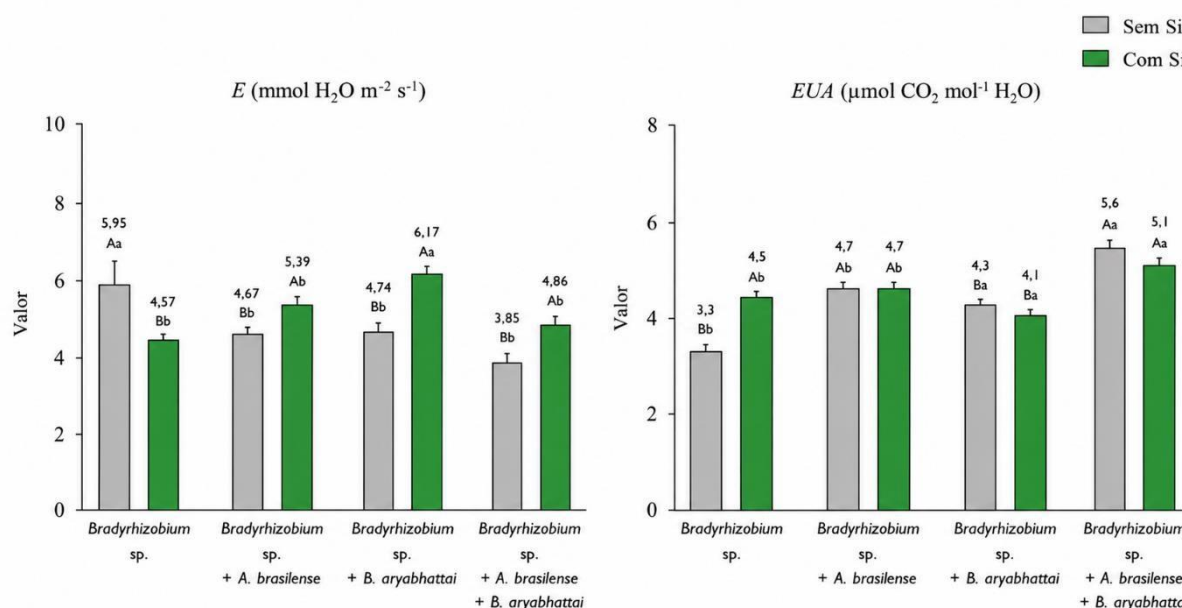
Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Nota: Ci = concentração intercelular de CO₂ (μmol mol⁻¹); gs = condutância estomática (mol H₂O m⁻² s⁻¹); A = taxa fotossintética líquida (μmol CO₂ m⁻² s⁻¹). Barras cinzas representam a ausência de aplicação foliar de silício (Sem Si) e barras verdes representam a aplicação foliar de silício (Com Si). Médias seguidas por letras minúsculas distintas diferem entre si quanto às estratégias de coinoculação, enquanto letras maiúsculas distintas diferem entre si quanto à aplicação foliar de silício, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Para a taxa de transpiração (E), na ausência de silício, a inoculação isolada com *Bradyrhizobium* sp. apresentou o maior valor, enquanto a associação de *Bradyrhizobium* sp. + *A. brasilense* + *B. aryabhattai* apresentou o menor valor entre as estratégias avaliadas. Na presença de silício, a coinoculação com *Bradyrhizobium* sp. + *B. aryabhattai* apresentou maior

taxa de transpiração. Para a eficiência do uso da água (EUA), na ausência de silício, os maiores valores foram observados nas estratégias contendo *B. aryabhattai*, enquanto a inoculação isolada com *Bradyrhizobium* sp. apresentou o menor valor. Na presença de silício, a associação de *Bradyrhizobium* sp. + *A. brasilense* + *B. aryabhattai* apresentou a maior eficiência do uso da água (Gráfico 10).

Gráfico 10 – Efeito da aplicação foliar de silício associada a diferentes estratégias de inoculação e coinoculação sobre a taxa de transpiração (*E*) e a eficiência do uso da água (*EUA*) em plantas de soja.



Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Nota: *E* = taxa de transpiração ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$); *EUA* = eficiência do uso da água ($\mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$). Barras cinzas representam a ausência de aplicação foliar de silício (Sem Si) e barras verdes representam a aplicação foliar de silício (Com Si). Médias seguidas por letras minúsculas distintas diferem entre si quanto às estratégias de coinoculação, enquanto letras maiúsculas distintas diferem entre si quanto à aplicação foliar de silício, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A literatura relata que o silício pode atuar na manutenção das relações hídricas e da atividade fisiológica das plantas, especialmente sob condições de deficiência hídrica. Entre os mecanismos descritos estão a redução da perda de água, a manutenção do potencial hídrico foliar e a preservação da funcionalidade do aparato fotossintético, contribuindo para a assimilação de carbono sob condições ambientais limitantes (SAH et al., 2022). No presente estudo, entretanto, as respostas fisiológicas ao silício variaram de acordo com a estratégia de inoculação ou coinoculação, indicando que seus efeitos não ocorreram de maneira uniforme entre as combinações microbianas avaliadas.

As diferenças observadas para Ci, gs e A demonstram que as estratégias de inoculação e coinoculação influenciaram as trocas gasosas da soja de maneira distinta em função da aplicação de silício. Na presença de Si, os maiores valores observados em determinadas coinoculações para essas variáveis indicam maior atividade de trocas gasosas. Entretanto, as respostas observadas também na ausência de silício demonstram que parte da variação fisiológica esteve associada às próprias combinações microbianas, e não exclusivamente à aplicação foliar de Si.

As respostas fisiológicas observadas podem estar relacionadas, entre outros fatores, aos efeitos das bactérias promotoras de crescimento sobre o desenvolvimento e o estado nutricional das plantas. A literatura relata que uma adequada nutrição nitrogenada está associada à síntese de clorofila, proteínas e enzimas envolvidas no processo fotossintético, podendo favorecer a assimilação de carbono e a produção de fotoassimilados (KASCHUK et al., 2012; DORMEYER et al., 2019; OLIVEIRA et al., 2025). No presente estudo, embora tenham sido observadas alterações na nodulação, a fixação biológica de nitrogênio não foi quantificada diretamente, não sendo possível atribuir as respostas fisiológicas exclusivamente a esse mecanismo.

As respostas de E e EUA também evidenciaram a dependência da combinação entre os fatores. Na ausência de silício, as estratégias contendo *B. aryabhatai* apresentaram maiores valores de EUA em relação à inoculação isolada com *Bradyrhizobium* sp., demonstrando que respostas favoráveis à eficiência do uso da água também ocorreram independentemente da aplicação de Si. Na presença de silício, a maior EUA observada na associação de *Bradyrhizobium* sp. + *A. brasilense* + *B. aryabhatai* indica resposta específica dessa combinação microbiana à aplicação foliar de silício.

Em conjunto, os resultados demonstram que as respostas fisiológicas da soja foram determinadas pela interação entre a aplicação foliar de silício e as estratégias de inoculação ou coinoculação. Os efeitos observados não foram uniformemente dependentes da aplicação de Si, uma vez que determinadas combinações microbianas apresentaram respostas fisiológicas favoráveis também na sua ausência. Dessa forma, os resultados evidenciam que o desempenho fisiológico da cultura depende da combinação específica entre os microrganismos utilizados e a aplicação foliar de silício.

4. CONCLUSÃO

As respostas agronômicas e fisiológicas da soja foram dependentes da interação entre a aplicação foliar de silício e as estratégias de inoculação e coinoculação. A associação de *Bradyrhizobium* sp. + *A. brasilense* apresentou resposta favorável à aplicação de silício para características relacionadas à nodulação e às trocas gasosas, enquanto a coinoculação de *Bradyrhizobium* sp. + *B. aryabhattai*, associada à aplicação foliar de silício, proporcionou o maior desempenho produtivo entre os tratamentos avaliados. A aplicação foliar de silício também promoveu respostas fisiológicas e agronômicas específicas em determinadas combinações microbianas, sem apresentar efeito positivo uniforme entre todas as estratégias avaliadas. Assim, os resultados evidenciam que os efeitos da aplicação foliar de silício na soja dependem da composição microbiana utilizada na inoculação ou coinoculação.

5. REFERÊNCIAS

- ABDULLAH, M. M.; WARAICH, E. A.; AHMAD, M.; et al. Improving soybean drought tolerance via silicon-induced changes in growth, physiological, biochemical, and root characteristics. **Plant Signaling & Behavior**, v. 20, n. 1, art. 2465232, 2025. DOI: 10.1080/15592324.2025.2465232.
- BARBOSA, J. Z.; HUNGRIA, M.; SENA, J. V. S.; POGGERE, G.; REIS, A. R.; CORRÊA, R. S. Meta-analysis reveals benefits of co-inoculation of soybean with *Azospirillum brasilense* and *Bradyrhizobium* spp. in Brazil. **Applied Soil Ecology**, v. 163, art. 103913, 2021. DOI: 10.1016/j.apsoil.2021.103913.
- CANTARELLA, H.; QUAGGIO, D.; MATTOS JR., D.; BOARETTO, R. M.; RAIJ, B. VAN. **Boletim 100: recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. 1. ed. Campinas: Instituto Agrônômico de Campinas, 2022. 489 p.
- DAGMA. Dagma 7621 I2X. 2025. Disponível em: <https://dagma.com.br/produtos/soja/dagma-7621-i2x/>. Acesso em: 8 jul. 2026.
- DEVI, N. S. A.; KUMUTHA, K.; ANANDHAM, R.; KRISHNAMOORTHY, R. Induction of moisture stress tolerance by *Bacillus* and *Paenibacillus* in pigeon pea (*Cajanus cajan* L.). **3 Biotech**, v. 11, n. 7, art. 355, 2021. DOI: 10.1007/s13205-021-02901-w.
- DORMEYER, M.; LENTES, S.; RICHTS, B.; HEERMANN, R.; ISCHEBECK, T.; COMMICHAU, F. M. Variants of the *Bacillus subtilis* LysR-Type Regulator GltC with Altered Activator and Repressor Function. **Frontiers in Microbiology**, v. 10, art. 2321, 2019. DOI: 10.3389/fmicb.2019.02321.
- FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer analysis system to fixed effects split plot type designs. **Brazilian Journal of Biometrics**, v. 37, n. 4, p. 529–535, 2019. DOI: 10.28951/rbb.v37i4.450.
- FREITAS, V. F.; CEREZINI, P.; HUNGRIA, M.; NOGUEIRA, M. A. Strategies to deal with drought-stress in biological nitrogen fixation in soybean. **Applied Soil Ecology**, v. 172, art. 104352, 2022. DOI: 10.1016/j.apsoil.2021.104352.
- KASCHUK, G.; YIN, X.; HUNGRIA, M.; LEFFELAAR, P. A.; GILLER, K. E.; KUYPER, T. W. Photosynthetic adaptation of soybean due to varying effectiveness of N₂ fixation by two distinct *Bradyrhizobium japonicum* strains. **Environmental and Experimental Botany**, v. 76, p. 1–6, 2012. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2011.10.002.

MALIK, M. A.; WANI, A. H.; MIR, S. H.; REHMAN, I. U.; TAHIR, I.; AHMAD, P.; et al. Elucidating the role of silicon in drought stress tolerance in plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 165, p. 187–195, 2021. DOI: 10.1016/j.plaphy.2021.04.021.

MUN, B.-G.; HUSSAIN, A.; PARK, Y.-G.; KANG, S.-M.; LEE, I.-J.; YUN, B.-W. The PGPR *Bacillus aryabhattai* promotes soybean growth via nutrient and chlorophyll maintenance and the production of butanoic acid. **Frontiers in Plant Science**, v. 15, art. 1341993, 2024. DOI: 10.3389/fpls.2024.1341993.

OLIVEIRA, C. E. S.; JALAL, A.; BOLETA, G. H. M.; et al. Rhizobacteria co-inoculation methods improve grain yield, nutrient absorption and leaf gas exchange in soybean. **International Journal of Plant Production**, v. 19, n. 3, p. 469–490, 2025. DOI: 10.1007/s42106-025-00349-z.

PARK, Y.-G.; MUN, B.-G.; KANG, S.-M.; et al. *Bacillus aryabhattai* SRB02 tolerates oxidative and nitrosative stress and promotes the growth of soybean by modulating the production of phytohormones. **PLOS ONE**, v. 12, n. 3, e0173203, 2017. DOI: 10.1371/journal.pone.0173203.

RAIJ, B. van; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. (ed.). **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agronômico, 2001. 285 p.

SAH, S. K.; REDDY, K. R.; LI, J. Silicon enhances plant vegetative growth and soil water retention of soybean (*Glycine max*) plants under water-limiting conditions. **Plants**, v. 11, n. 13, art. 1687, 2022. DOI: 10.3390/plants11131687.

SILVA, E. R.; ZOZ, J.; OLIVEIRA, C. E. S.; et al. Can co-inoculation of *Bradyrhizobium* and *Azospirillum* alleviate adverse effects of drought stress on soybean (*Glycine max* L. Merrill.)? **Archives of Microbiology**, v. 201, n. 3, p. 325–335, 2019. DOI: 10.1007/s00203-018-01617-5.

SOUZA, K. S.; FARIA, G. A.; ITO, W. C. N.; et al. Microorganism co-inoculation associated with potassium silicate doses on nutrition, production components, and yield of soybean. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 29, n. 10, e285774, 2025. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v29n10e285774.

STEINER, F.; OLIVEIRA, C. E. S.; ZOZ, T.; ZUFFO, A. M.; FREITAS, R. S. Co-inoculation of common bean with *Rhizobium* and *Azospirillum* enhance the drought tolerance. **Russian**

Journal of Plant Physiology, v. 67, n. 5, p. 923–932, 2020. DOI: 10.1134/S1021443720050167.

STEINER, F.; ZUFFO, A. M.; BUSH, A.; SANTOS, D. M. S. Silicate fertilization potentiates the nodule formation and symbiotic nitrogen fixation in soybean. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 48, n. 3, p. 212–221, 2018. DOI: 10.1590/1983-40632018v4851472.

TRIPATHI, P.; NA, C.-I.; KIM, Y. Effect of silicon fertilizer treatment on nodule formation and yield in soybean (*Glycine max* L.). **European Journal of Agronomy**, v. 122, art. 126172, 2021. DOI: 10.1016/j.eja.2020.126172.