

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

Karina da Silva Souza

**Coinoculação de microrganismos associada a doses de silício na nutrição,
componentes produtivos e produtividade da soja**

Ilha Solteira
2024

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

KARINA DA SILVA SOUZA

**COINOCULAÇÃO DE MICRORGANISMOS ASSOCIADA A DOSES
DE SILÍCIO NA NUTRIÇÃO, COMPONENTES PRODUTIVOS E
PRODUTIVIDADE DA SOJA**

Dissertação apresentada à Faculdade de
Engenharia de Ilha Solteira – Unesp como
parte dos requisitos para obtenção do título
de mestre. Especialidade: Sistemas de
Produção

Glaucia Amorim Faria
Orientador

Marcelo Carvalho Minhoto Teixeira Filho
Coorientador

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

S729c Souza, Karina da Silva.
Coinoculação de microrganismos associada a doses de silício na nutrição, componentes produtivos e produtividade da soja / Karina da Silva Souza. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2024
43 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Sistemas de Produção, 2024

Orientador: Glaucia Amorim Faria
Co-orientador: Marcelo Carvalho Minhoto Teixeira Filho
Inclui bibliografia

1. Silicato de potássio. 2. Adubação foliar. 3. *Bradyrhizobium japonicum*. 4. *Bacillus Aryabhattai*. 5. *Glycine max* L..


Amanda Sertori dos Santos
Bibliotecária - CRB/8-9061
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao
Usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: COINOCULAÇÃO DE MICRORGANISMOS ASSOCIADA A DOSES DE SILÍCIO NA NUTRIÇÃO, COMPONENTES PRODUTIVOS E PRODUTIVIDADE DA SOJA

AUTORA: KARINA DA SILVA SOUZA

ORIENTADORA: GLAUCIA AMORIM FARIA

COORDENADOR: MARCELO CARVALHO MINHOTO TEIXEIRA FILHO

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em Agronomia, especialidade: Sistemas de Produção pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. MARCELO CARVALHO MINHOTO TEIXEIRA FILHO (Participação Virtual)

Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP



Prof. Dr. FERNANDO SHINTATE GALINDO (Participação Virtual)

Departamento de Produção Vegetal / Faculdade de Ciências Agrárias e Tecnológicas - UNESP

Prof. Dr. FLÁVIO HIROSHI KANEKO (Participação Virtual)

Departamento de Agronomia / Universidade Federal do Triângulo



Documento assinado digitalmente

FLAVIO HIROSHI KANEKO

Data: 19/02/2024 12:09:20-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Ilha Solteira, 19 de fevereiro de 2024

Impacto potencial desta pesquisa

Esta pesquisa visa impulsionar a sustentabilidade na produção de soja, com resultados que, além de beneficiar a comunidade científica, têm potencial para influenciar práticas agrícolas globais, contribuindo para a segurança alimentar e a redução do impacto ambiental na produção agrícola em um mundo em constante evolução.

Potential impact of this research

This research aims to boost sustainability in soybean production, with results that not only benefit the scientific community but also have the potential to positively influence global agricultural practices, contributing to food security and reducing environmental impact in an ever-evolving world.

Impacto potencial de esta investigación

Esta investigación tiene como objetivo impulsar la sostenibilidad en la producción de soja, con resultados que no solo benefician a la comunidad científica, sino que también tienen el potencial de influir positivamente en las prácticas agrícolas globales, contribuyendo a la seguridad alimentaria y reduciendo el impacto ambiental en la producción agrícola en un mundo en constante evolución.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha sobrinha, Flor, desejando que além de ser uma constante fonte de inspiração para mim, também encontre nesses esforços uma razão para seguir seus próprios sonhos. Que esta dedicação seja mais do que um lembrete de que os sonhos são possíveis, mas um estímulo para que ela também persiga seus objetivos com paixão e determinação. Que a jornada aqui registrada a motive a explorar seus próprios horizontes e alcançar tudo o que deseja. Que este trabalho seja um testemunho do poder dos sonhos e da busca pelo conhecimento, e que inspire não apenas a mim, mas também a ela, a trilhar um caminho de realizações.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela força e coragem que me permitiram persistir e alcançar este momento. Aos meus queridos pais, Lúcia e Gilson, quero expressar minha eterna gratidão por serem a fonte de incentivo, apoio e amor em minha vida. Vocês não apenas me proporcionaram tudo o que precisei, mas também investiram esforços para me garantir uma ótima educação. Cada sacrifício e gesto de carinho moldaram não apenas meu presente, mas também o futuro que estou construindo. Vocês são verdadeiramente os alicerces da pessoa que me tornei, e meu coração transborda de agradecimento por tudo que fizeram por mim.

À minha irmã, Camila, por sua presença constante em minha jornada. Sua confiança e reconhecimento em todas as metas que me propus a realizar foram um apoio inestimável. Suas palavras de encorajamento e sua presença amorosa são tesouros que guardarei para sempre em meu coração. Aos meus sobrinhos, Flor e José Miguel, que trouxeram alegria, leveza e valiosas lições de teimosia, persistência e coragem. Por fim, expresso meu agradecimento geral a toda a minha família, a cada um por fazer parte da minha vida e por compartilhar o amor e os valores que nos unem.

Ao meu namorado, José Otávio, que foi meu refúgio, calmaria, distração e a âncora que colocou meus pés de volta no chão no meio de tanta loucura. Sua presença e apoio foram fundamentais para manter o equilíbrio em meio aos desafios desta jornada.

À Professora Gláucia, agradeço o carinho, orientação, incentivo, cuidado e confiança depositados em mim. Ao meu coorientador Marcelo, que generosamente me acolheu e dedicou-se além de suas obrigações, contribuindo significativamente para a minha formação, agradeço a confiança e orientação.

A todas as amigas de república - Beatriz, Érica, Victória, Tatiane, Tamiris, Mairê e Noah - agradeço por me acolherem e se tornarem minha segunda família. Nos momentos de alegria, apoio mútuo e companheirismo, encontramos juntas uma força especial que tornou essa jornada ainda mais significativa.

Ao meu amigo, e colega de trabalho Otávio, por todo apoio, conversas e disponibilidade de me ensinar muito além de estatísticas básicas.

Aos dedicados colegas do Laboratório de Nutrição de Plantas, expresso minha sincera gratidão pela colaboração, camaradagem e risadas compartilhadas nas

inúmeras horas de trabalho. Quero estender meus agradecimentos aos técnicos Marcelo e Kaway por seus ensinamentos, bons momentos e por fazerem a diferença na vida de tantos alunos, inclusive na minha.

Aos reverenciados professores da Universidade, meu agradecimento pela nobre missão de transmitir conhecimentos tão valiosos. Aos colaboradores da UNESP, nos setores de pós-graduação, secretaria, zeladoria e transporte, agradeço a contribuição indireta, mas não menos importante, para o meu enriquecimento acadêmico.

Por fim, este trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES). Dedico minha profunda gratidão à CAPES pela bolsa que tornou possível essa jornada acadêmica.

A todos, meu sincero agradecimento.

“Um filósofo é, portanto, alguém que reconhece que há muitas coisas que não entende. E isso aflige-o. Deste ponto de vista, é, porém, mais sábio que todos os que se gabam do seu pretenso saber.”

Jostein Gaarder – O mundo de Sofia

RESUMO

A soja é uma cultura de grande relevância econômica, cujos grãos podem ter diversas finalidades de uso. Em um cenário de aumento da demanda por alimentos e desafios ambientais, os bioinsumos surgem como alternativas eficazes para alcançar a sustentabilidade. Assim, este estudo teve como objetivo avaliar os impactos da coinoculação de *Bradyrhizobium japonicum* e *Bacillus aryabhattai*, associados a doses de silicato de potássio aplicadas via foliar, no cultivo de soja. O experimento foi realizado na Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. O delineamento experimental adotado foi em blocos ao acaso, em um esquema fatorial 2x5, sendo respectivamente, fator inoculante (*Bradyrhizobium japonicum*; *Bradyrhizobium japonicum* + *Bacillus aryabhattai*), e doses de silicato de potássio foliar (0,0; 1,50; 2,50; 3,50; 4,50 L ha⁻¹) divididas em dois estádios (R2 e R3), totalizando dez tratamentos, com quatro repetições. Avaliou-se aspectos biométricos, produtivos e nutricionais. A análise estatística dos dados foi conduzida utilizando o software R, e os resultados revelaram que a coinoculação de *B. japonicum* e *B. aryabhattai* resultou em aumento na altura da planta, e redução no número de nós reprodutivos. Além disso, a inoculação com *B. japonicum* promoveu maior número de vagens por planta e massa de cem grãos. Também se observou um aumento na altura de inserção da primeira vagem com a interação de fatores. A coinoculação com *B. japonicum* e *B. aryabhattai*, assim como as doses de silicato de potássio via foliar, não influenciaram as concentrações de K e Si na palhada e grãos, e a produtividade de grãos de soja nas condições estudadas (alta fertilidade do solo e precipitação pluvial não limitante).

Palavras-chave: silicato de potássio; adubação foliar; *Bradyrhizobium japonicum*; *Bacillus aryabhattai*; *Glycine max* L.

ABSTRACT

Soybean is a crop of great economic relevance, with grains serving various purposes. In a scenario of increasing demand for food and environmental challenges, bioinputs emerge as effective alternatives to achieve sustainability. Thus, this study aimed to evaluate the impacts of co-inoculation of *Bradyrhizobium japonicum* and *Bacillus aryabhattai*, associated with foliar applications of potassium silicate, on soybean cultivation. The experiment was conducted at the Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. The experimental design adopted was a randomized complete block in a 2x5 factorial scheme, respectively representing the inoculant factor (*Bradyrhizobium japonicum*; *Bradyrhizobium japonicum* + *Bacillus aryabhattai*) and foliar potassium silicate doses (0.0; 1.50; 2.50; 3.50; 4.50 L ha⁻¹) divided into two stages (R2 and R3), totaling ten treatments with four replications. Biometric, productive, and nutritional aspects were evaluated. Statistical analysis of the data was conducted using R software, and the results revealed that the co-inoculation of *B. japonicum* and *B. aryabhattai* led to an increase in plant height and a reduction in the number of reproductive nodes. Additionally, inoculation with *B. japonicum* promoted a higher number of pods per plant and a greater mass of one hundred grains. An increase in the insertion height of the first pod was also observed with the interaction of factors. Co-inoculation with *B. japonicum* and *B. aryabhattai*, as well as doses of potassium silicate via foliar, did not influence the concentrations of K and Si in straw and grains, and the grain yield of soybean under the conditions studied (high soil fertility and non-limiting rainfall).

Keywords: potassium silicate; foliar fertilization; *Bradyrhizobium japonicum*; *Bacillus aryabhattai*; *Glycine max* L.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 — Localização geográfica na área experimental na Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão de Selvíria, Mato Grosso do Sul, Brasil.	24
Figura 2 — Pluviosidade (mm), umidade relativa (%) e temperatura mínima e máxima (°C) do município de Ilha Solteira (SP) a cada cinco dias, no período decorrente do experimento, entre novembro de 2022 a março de 2023 (clima – Feis)	25
Figura 3 — Apresentação esquemática dos tratamentos experimentais e suas respectivas formas de aplicação.	27
Figura 4 — Apresentação esquemática detalhando os métodos de análise das variáveis altura de planta (cm), inserção de primeira vagem (cm) e número de nós reprodutivos na soja.	29
Figura 6 — Desdobramento para a variável inserção de primeira vagem de soja em função da coinoculação de bactérias e doses de silicato de potássio aplicados. Selvíria – MS, 2023.	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 — Doses, ingredientes ativos e classe agronômica das três aplicações de manejo químico realizadas.....	26
Tabela 2 — Análise de variância para as variáveis, massa de palhada (MP), concentração de potássio (K) na palhada e nos grãos e concentração de silício (Si) na palhada e nos grãos em função da inoculação e coinoculação de bactérias associadas a doses de silicato de potássio aplicados na soja. Selvíria - MS, 2023.....	30
Tabela 3 — Análise de variância para as variáveis, vagens por planta (VP), grãos por vagem (GV), massa de cem grãos (MCG), altura de planta (AL), inserção de primeira vagem (IPV), nós reprodutivos (NR) e produtividade de grãos (PROD), em função da coinoculação de bactérias e doses de silicato de potássio aplicados. Selvíria - MS, 2023.	32

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	17
2.1	SOJA (<i>GLYCINE MAX L.</i>).....	17
2.2	DESAFIOS ASSOCIADOS ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS	18
2.3	<i>BRADYRHIZOBIUM JAPONICUM</i>	19
2.4	<i>BACILLUS ARYABHATTAI</i>	20
2.5	SILÍCIO	22
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	24
3.1	LOCALIZAÇÃO E DESCRIÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL	24
3.2	DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E TRATAMENTOS.....	25
3.3	INSTALAÇÃO E CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO.....	26
3.4	AVALIAÇÕES	28
3.5	ANÁLISES ESTATÍSTICAS.....	29
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	30
5	CONCLUSÃO.....	37
	REFERÊNCIAS	38

1 INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max*) é uma planta que pertence à família Fabaceae, e seu grão tem grande importância pela sua versatilidade, podendo ser usado como fonte de proteína para a alimentação animal, produção de óleo vegetal e biocombustíveis. Apesar de ser uma cultura de grande importância econômica, a soja enfrenta diversos desafios que podem comprometer sua produtividade e rentabilidade. Entre esses desafios, destacam-se as adversidades climáticas, como seca e excesso de chuvas, além do surgimento de pragas e doenças que podem reduzir a qualidade dos grãos.

A produção agrícola desempenha um papel essencial na segurança alimentar global e na preservação da sustentabilidade ambiental. Em um cenário marcado pelo crescimento populacional e desafios relacionados a mudança climática, torna-se de extrema relevância a busca por estratégias que otimizem a produtividade agrícola. É indiscutível que, dentre as estratégias de manejo agrícola disponíveis, a incorporação de bioinsumos se destaca como uma das práticas mais sustentáveis, especialmente quando se consideram grandes culturas, como a soja (Meyer, 2022).

No Brasil, a adoção do uso de microrganismos benéficos têm sido uma prática cada vez mais comum entre os produtores, em busca de aumentar a produtividade e reduzir custos com insumos. Além disso, tal prática tem sido associada à melhoria da qualidade dos grãos e sustentabilidade do sistema produtivo (Cargnelutti *et al.*, 2021).

Dentre os microrganismos benéficos, as bactérias dos gêneros *Bradyrhizobium* e *Bacillus* se destacam devido à influência positiva na nutrição, crescimento das plantas, capacidade de enfrentar estresses bióticos e abióticos, e melhoria da qualidade de grãos (Cargnelutti *et al.*, 2021; Diaz; Baron; Rigobelo, 2019). No Brasil, mais de 80% dos produtores de soja optam pelo uso de inoculantes contendo *Bradyrhizobium spp.* para promover a fixação biológica de nitrogênio (Meyer, 2022), o que auxilia na nutrição vegetal, sem a necessidade ou com aplicação muito baixa de fertilizantes nitrogenados, contribuindo para a sustentabilidade agrícola.

Vale destacar que outros tipos de inoculantes, como à base de *Bacillus spp.* para solubilização de fósforo e micorrizas, estão sendo gradualmente incorporados ao sistema de produção, devido à capacidade de colonização radicular, alta sobrevivência e multiplicidade em ambientes radiculares, o que favorece o

crescimento das plantas e inibe fitopatógenos (Beneduzi, Ambrosini e Passaglia, 2012; Meyer, 2022).

Nesse sentido, a inoculação e coinoculação da soja com microrganismos benéficos, em especial, *Bradyrhizobium japonicum* e *Bacillus aryabhattai*, tem sido uma estratégia eficaz para a fixação de nitrogênio e promover o crescimento das plantas, o que pode resultar em um aumento significativo na produtividade de grãos (Zhao *et al.*, 2022).

Além disso, outras estratégias têm surgido como promissor manejo de culturas, é o caso do silício, o qual é conhecido por fortalecer a resistência da planta a uma ampla gama de fatores de estresse, incluindo doenças, pragas e condições ambientais adversas, como seca e salinidade do solo (Huang *et al.*, 2021; Islam *et al.*, 2020). Além disso, o silício promove o crescimento vegetal ao aumentar a absorção de nutrientes, melhorando a eficiência fotossintética e estimulando a produção de fitohormônios (Mauad *et al.*, 2016).

O silício pode ser aplicado na cultura da soja de diversas formas, como por meio da irrigação, pulverização foliar ou aplicação direta no solo. Quando aplicado via foliar, a acumulação de silício nas folhas resulta na diminuição da transpiração, levando a uma menor demanda hídrica das plantas, o que é atribuído à formação de uma dupla camada de sílica, que reduz a abertura dos estômatos, limitando, assim, a perda de água (Oliveira; Castro, 2002).

E, por isso, acredita-se que a união destes dois elementos, aproveitando os benefícios da proteção conferida pelo silício, a fixação biológica do nitrogênio, a absorção de nutrientes e outros ganhos das inoculações, resultará em vantagens sinérgicas, proporcionando um aumento substancial na produtividade e resistência da cultura da soja.

Portanto, o objetivo deste estudo foi avaliar a coinoculação de *Bradyrhizobium japonicum* e *Bacillus aryabhattai*, em associação com doses de silicato de potássio no cultivo da soja. A investigação se concentra em verificar se essa combinação pode potencializar a eficiência e resistência da planta sob fatores estressantes, abióticos e bióticos em condições de sequeiro no Cerrado.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 SOJA (*GLYCINE MAX L.*)

A soja, é uma das culturas mais importantes do mundo em termos econômicos e agrícolas. Ela pertence à família Fabaceae e é cultivada em diversas regiões do globo, sendo uma fonte valiosa de alimentos, óleo e proteínas vegetais. É amplamente distribuída, e o Brasil foi o maior produtor mundial, com uma produção de 154.617,4 mil t na safra de 2022/23, segundo dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2024).

A soja desempenha um papel crucial na segurança alimentar global. É uma das principais fontes de proteína vegetal, contendo todos os aminoácidos essenciais necessários para uma dieta equilibrada. De acordo com Silva e Uchôa (2019), a soja contribui significativamente para a dieta de muitas pessoas, especialmente em países como o Brasil e os Estados Unidos, onde é amplamente consumida na forma de alimentos como tofu, leite de soja, óleo de soja, entre outros.

Além de seu valor nutricional, a soja desempenha um papel fundamental na indústria. O óleo de soja é amplamente utilizado na fabricação de produtos alimentícios, incluindo margarinas, maioneses e produtos de panificação. Além disso, é uma fonte valiosa de matéria-prima para a produção de biocombustíveis, como o biodiesel. Segundo Moraes et al. (2019), o grão tem contribuído significativamente para a diversificação e sustentabilidade da matriz energética em vários países.

Como planta leguminosa, é capaz de realizar associação simbiótica com bactérias do gênero *Bradyrhizobium*, as quais possuem a capacidade de fixar nitrogênio atmosférico, reduzindo a necessidade de fertilizantes nitrogenados sintéticos e, assim, diminuindo os impactos ambientais associados à agricultura (Hungria; Franchini, 2010).

Ainda de acordo com os autores supracitados, a soja desempenha um papel multifacetado e crucial na sociedade moderna. Sua importância como fonte de alimento, matéria-prima industrial e como um componente essencial da agricultura é inegável. Portanto, o cultivo e a pesquisa contínua sobre a soja são fundamentais para atender às crescentes demandas globais por alimentos, energia e recursos renováveis.

2.2 DESAFIOS ASSOCIADOS ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

As mudanças climáticas têm sido associadas a um aumento na temperatura média global e a eventos climáticos extremos, como secas. Essas condições podem afetar adversamente a produção de soja. Estudos como o de Lobell e Asner (2003) demonstraram que o aumento da temperatura pode levar a uma redução na produtividade da soja, principalmente em regiões tropicais e subtropicais.

Além disso, secas prolongadas podem causar estresse hídrico às plantas de soja, reduzindo o desenvolvimento e o rendimento. De acordo com Silva et al. (2018), a disponibilidade de água é um fator crítico para o crescimento da soja, e mudanças nos padrões de chuva podem impactar significativamente a produção.

As mudanças climáticas também podem influenciar a distribuição e a prevalência de pragas e doenças que afetam a soja. Pesquisadores como Macedo et al. (2018) alertam para o aumento da incidência de pragas, como lagartas e percevejos, em decorrência do clima mais quente. Isso pode exigir um maior uso de pesticidas, com implicações para a saúde humana e ambiental.

A soja é uma cultura que demanda quantidades significativas de água. Mudanças nos padrões de chuva, evapotranspiração e disponibilidade de água subterrânea podem impactar a produção de soja. Estudos como o de Lobell e Burke (2010) indicaram que variações na demanda hídrica podem ser um desafio importante para os agricultores de soja em um cenário de mudanças climáticas.

Para enfrentar os desafios impostos pelas mudanças climáticas, é fundamental que os produtores de soja adotem práticas de adaptação e mitigação. A pesquisa agrícola desempenha um papel crucial na identificação de variedades de soja mais resistentes ao calor e à seca, bem como na busca por práticas de cultivo mais sustentáveis.

Além disso, a promoção de sistemas agrícolas mais resilientes, como a rotação de culturas, a integração de árvores em sistemas agroflorestais e o uso de microrganismos fixadores de nitrogênio podem contribuir para a mitigação das mudanças climáticas, ajudando a sequestrar carbono e melhorar a resiliência do solo. A substituição de fertilizantes nitrogenados, por microrganismos fixadores de nitrogênio na cultura da soja ocasionou uma redução na emissão de 183 milhões de toneladas de CO₂, o que vale cinco milhões de euros em créditos de carbono, na safra de 2019/20 (Telles, Nogueira e Hungria, 2023).

Essa diminuição na taxa de emissão de gases de efeito estufa ocorre pela associação entre o ciclo do nitrogênio e o ciclo do carbono (Thornton *et al.*, 2007). O aumento da biomassa vegetal ocasionado pela FBN leva a um maior sequestro de carbono pela planta (Kou-giesbrecht e Menge, 2019), retirando então CO₂ da atmosfera e o imobilizando no solo. Dessa forma, contribuindo para uma diminuição do aquecimento global (Stagnari *et al.*, 2017).

Apesar das mudanças climáticas representam uma ameaça significativa para a produção de culturas agrícolas de importância econômica, a adoção de práticas sustentáveis com cooperação global, torna possível contornar esses desafios e mitigar impactos ambientais.

2.3 *BRADYRHIZOBIUM JAPONICUM*

As bactérias promotoras de crescimento de plantas (BPCPs) desempenham um papel fundamental na promoção do desenvolvimento vegetal, auxiliando as plantas a absorver nutrientes, resistir a estresses bióticos e abióticos e aumentar a produtividade agrícola. Entre essas bactérias, *Bradyrhizobium japonicum* se destaca por sua capacidade de estabelecer uma relação simbiótica com a soja (*Glycine max* L.), uma das culturas mais importantes do mundo.

Bradyrhizobium japonicum é uma bactéria do gênero *Bradyrhizobium* que forma uma relação simbiótica com as raízes da soja. Essa simbiose é fundamental para a saúde e o crescimento da planta de soja. Quando as raízes da soja entram em contato com as bactérias, ocorre um benefício mútuo. As bactérias fixam o nitrogênio atmosférico, convertendo-o em uma forma que pode ser absorvida pelas plantas, enquanto as plantas fornecem carboidratos às bactérias (Vieira, 2018).

A fixação de nitrogênio é um dos principais benefícios da simbiose entre *Bradyrhizobium japonicum* e a soja, e o nitrogênio é um nutriente chave para o crescimento das plantas, e a soja tem uma alta demanda por esse elemento químico (Hungria, Campo e Mendes, 2007). Por meio da fixação de nitrogênio, as bactérias fornecem uma fonte sustentável de nitrogênio para a soja, reduzindo a necessidade de fertilizantes nitrogenados sintéticos. A substituição de fertilizantes nitrogenados pelas bactérias fixadoras de nitrogênio, trouxe uma economia de 15,2 bilhões de dólares para o país na safra de 2019/20, além dos benefícios associados à diminuição de emissão de carbono (Telles; Nogueira e Hungria, 2023).

A simbiose com *Bradyrhizobium japonicum* é um componente fundamental da agricultura sustentável. A redução do uso de fertilizantes nitrogenados sintéticos, que são produzidos com alto consumo de energia e liberam gases de efeito estufa, contribui para a mitigação das mudanças climáticas. Além disso, a fixação de nitrogênio promovida pelas bactérias reduz a contaminação do solo e da água por nitratos oriundos de fertilizantes nitrogenados, que é um problema ambiental significativo.

A inoculação com *Bradyrhizobium japonicum* de sementes está diretamente relacionada a uma maior produtividade da soja. Pesquisas, como a de Hungria et al. (2006), destacam que a inoculação da soja com cepas eficientes de *B. japonicum* resulta em um aumento significativo nos rendimentos das culturas. Isso é particularmente importante, considerando a crescente demanda por alimentos em todo o mundo.

Bradyrhizobium japonicum é uma bactéria consolidada para FBN, que interfere positivamente na promoção do crescimento e produtividade da soja, desempenhando um papel crucial na sustentabilidade agrícola.

2.4 BACILLUS ARYABHATTAI

As bactérias BPCPs têm sido objeto de crescente interesse na agricultura devido à sua capacidade de melhorar o crescimento e a saúde das plantas. Entre essas bactérias, *Bacillus aryabhattai* emerge como uma espécie promissora, com potencial para aumentar a produtividade agrícola.

Bacillus aryabhattai é uma espécie bacteriana do gênero *Bacillus*, conhecido por sua versatilidade e capacidade de colonizar ambientes diversos. Pesquisas como as de Tripathi et al. (2019) destacaram sua resistência a condições adversas, como altas temperaturas e salinidade, tornando-o um candidato promissor para aplicação em diferentes culturas.

A eficácia de *Bacillus aryabhattai* como BPCPs reside em sua capacidade de promover o crescimento das plantas por meio de vários mecanismos. Esses incluem a produção de substâncias promotoras de crescimento, como ácido indolacético (IAA) e sideróforos, que auxiliam na absorção de nutrientes pelas plantas (Verma et al., 2015). Além disso, a bactéria pode antagonizar patógenos, reduzindo o estresse biótico nas plantas.

A presença de *Bacillus aryabhattai* no solo promove a solubilização de nutrientes, como fósforo, tornando-os mais disponíveis para as plantas. Isso pode resultar em um aumento significativo na absorção de nutrientes, melhorando a nutrição e o desenvolvimento das plantas (Verma *et al.*, 2015).

Bacillus aryabhattai também demonstrou a capacidade de melhorar a resistência das plantas a estresses abióticos, como seca, salinidade e temperaturas extremas (Tripathi *et al.*, 2019). Isso é particularmente relevante em um contexto de mudanças climáticas, onde as plantas enfrentam desafios crescentes.

A aplicação de *Bacillus aryabhattai* na agricultura promove práticas mais sustentáveis. A redução do uso de fertilizantes minerais e defensivos agrícolas, associada aos benefícios para a nutrição e resistência das plantas, contribui para a redução dos impactos ambientais da agricultura (Verma *et al.*, 2015).

O *Bacillus aryabhattai* representa um exemplo promissor de BPCPs com potencial para revolucionar a agricultura. sua capacidade de promover o crescimento e a saúde das plantas, melhorar a nutrição, aumentar a resistência a estresses e reduzir a dependência de produtos químicos torna-o uma ferramenta valiosa para a agricultura sustentável, contribuindo para a segurança alimentar global e a proteção do meio ambiente

A coinoculação, que envolve a combinação de diferentes BPCPs, é uma estratégia que tem ganhado destaque na agricultura devido aos benefícios potenciais que oferece às plantas. A partir de 2013, diversas pesquisas comprovaram a eficácia da coinoculação em aumentar a produtividade em comparação à inoculação isolada, visto isso, em cinco anos houve um aumento de adesão pelos produtores, causando um aumento de 25% das áreas de soja coinoculadas, o que abrange uma área de dez milhões de hectares (Santos; Nogueira e Hungria, 2021).

Nesse contexto, a coinoculação de *Bradyrhizobium japonicum* e *Bacillus aryabhattai* emerge como uma abordagem promissora, combinando os benefícios de ambos os microrganismos. O *B. japonicum* é conhecido por sua capacidade de estabelecer uma relação simbiótica com as raízes da soja, promovendo FBN e reduzindo a necessidade de fertilizantes nitrogenados sintéticos (Hungria *et al.*, 2006). Por outro lado, *B. aryabhattai* demonstrou a capacidade de melhorar a resistência das plantas a estresses abióticos, promovendo o crescimento e a nutrição das plantas (Tripathi *et al.*, 2019). Sendo a coinoculação, portanto, uma abordagem potencial de

contribuir significativamente para a produção agrícola eficiente e ambientalmente responsável.

2.5 SILÍCIO

O silício (Si) é um elemento químico abundante na crosta terrestre e desempenha um papel importante na nutrição de plantas. A soja (*Glycine max* L.), uma das culturas mais importantes do mundo, também pode se beneficiar da absorção de silício.

O silício é amplamente reconhecido por seu papel benéfico na agricultura, uma vez que melhora a resistência das plantas a estresses bióticos e abióticos. Na cultura da soja, o silício desempenha um papel significativo na promoção do crescimento e no aumento da resistência a pragas e doenças (Datnoff *et al.*, 2001). Além disso, o silício contribui para a absorção de outros nutrientes, como o fósforo, melhorando a nutrição da soja.

A absorção de silício pelas plantas de soja ocorre principalmente na forma de ácido ortossilícico (H_4SiO_4), que é transportado através da planta até os locais de deposição nas células das folhas e caules. Durante esse processo, o silício é depositado nas células sob a forma de fitólitos, que são cristais de dióxido de silício (SiO_2). Esses fitólitos fortalecem as células das plantas, tornando-as mais resistentes a pragas e a patógenos.

O silício tem demonstrado influenciar positivamente o crescimento e desenvolvimento da soja. Pesquisas, como as de Guntzer *et al.* (2012), indicaram que a aplicação de silício pode resultar em um aumento na biomassa da soja, bem como na melhoria da arquitetura das plantas. Além disso, o silício está associado a um aumento na produção de clorofila e, conseqüentemente, na eficiência da fotossíntese, o que contribui para maiores rendimentos agrícolas.

Um dos benefícios mais significativos do silício para a soja é sua capacidade de melhorar a resistência a estresses abióticos, como seca, salinidade e altas temperaturas, bem como a estresses bióticos, como pragas e patógenos. A deposição de fitólitos nas células da planta atua como uma barreira física contra herbívoros, enquanto o fortalecimento das paredes celulares reduz a penetração de patógenos (Rodrigues *et al.*, 2015).

A utilização de silício na cultura da soja se alinha com práticas agrícolas sustentáveis. A melhoria da resistência das plantas a pragas e doenças reduz a necessidade de defensivos agrícolas, enquanto a maior eficiência fotossintética resultante da presença de silício contribui para a redução da emissão de gases de efeito estufa.

O silício desempenha um papel interessante na nutrição, crescimento e desenvolvimento da soja em condições adversas, como em condições de veranicos. Sua contribuição para a resistência da planta a estresses bióticos e abióticos, bem como sua capacidade de melhorar a nutrição e a eficiência fotossintética, o torna um elemento valioso na agricultura sustentável. A compreensão de como o silício beneficia a soja pode levar a práticas agrícolas mais eficientes e ambientalmente amigáveis.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 LOCALIZAÇÃO E DESCRIÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL

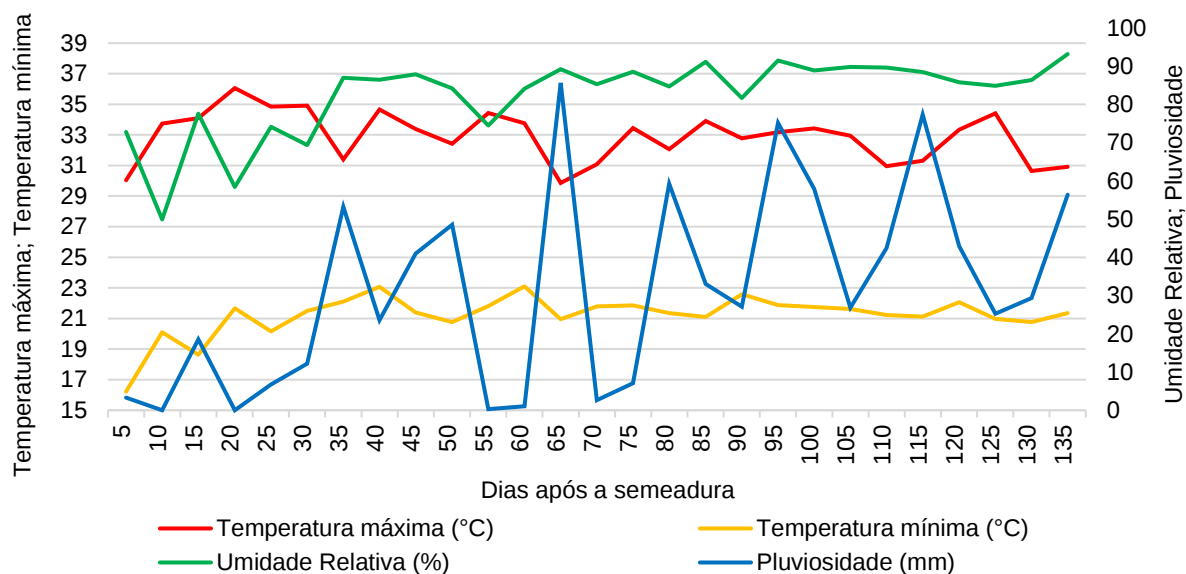
O experimento foi conduzido no período de novembro 2022 a março de 2023, na Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão (FEPE), da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS-Unesp). A FEPE é localizada no município de Selvíria – MS, e as coordenadas geográficas do local de instalação do experimento são de latitude 20°20'50" S, e longitude 51°24'08"W (Figura 1). O solo é classificado como LATOSSOLO VERMELHO distroférico, textura argilosa (Santos *et al.*, 2018). O clima na região é do tipo tropical úmido, caracterizado por chuvas no verão e estiagem no inverno, sendo classificado como Aw (Köppen e Geiger, 1928). Os dados meteorológicos correspondentes ao período de condução do experimento foram coletados pelo Canal CLIMA, para Ilha Solteira (Figura 2), cidade com rede meteorológica mais próxima.

Figura 1 — Localização geográfica na área experimental na Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão de Selvíria, Mato Grosso do Sul, Brasil



Fonte: Próprio autor

Figura 2 — Pluviosidade (mm), umidade relativa (%) e temperatura mínima e máxima (°C) do município de Ilha Solteira (SP) a cada cinco dias, no período decorrente do experimento, entre novembro de 2022 a março de 2023 (clima – Feis)



Fonte: Próprio autor

Antes da instalação do experimento foi coletado solo, na camada de 0,00 a 0,20 m, para análise química. Os atributos químicos de acordo com as metodologias de Raij *et al.* (2001) foram os seguintes: P (resina) = 43,8 mg dm⁻³; matéria orgânica (MO) = 22,3 g dm⁻³; pH (CaCl₂) = 5,6; K⁺ = 2,7; Ca²⁺ = 27; Mg²⁺ = 25,3; H+Al = 20,5; Al³⁺ = 0; S (SO₄) = 3,3 mg dm⁻³; B = 0,3 mg dm⁻³; Cu = 2,9 mg dm⁻³; Fe = 18,8 mg dm⁻³; Mn = 27,7 mg dm⁻³; Zn = 1,5 mg dm⁻³; soma de bases (SB) = 54,9; capacidade de troca catiônica (CTC) = 75,4 mmol_c dm⁻³; e saturação por bases (V) = 75,5%.

3.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E TRATAMENTOS

O delineamento experimental adotado foi em blocos ao acaso, em esquema fatorial 2x5, sendo o primeiro fator considerado adição do inoculante em duas composições (*Bradyrhizobium japonicum*; *Bacillus aryabhattai* + *Bradyrhizobium japonicum*) e o segundo fator adição de doses de silicato de potássio (0,0; 1,50; 2,50; 3,50; 4,50 L ha⁻¹) divididas igualmente em duas aplicações, totalizando dez tratamentos com quatro repetições. As parcelas experimentais foram compostas por

oito linhas com cinco metros de comprimento cada, e distância entre linha de 0,5 m, sendo a área útil da parcela as quatro linhas centrais, excluindo um metro das extremidades das linhas.

3.3 INSTALAÇÃO E CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO

A área escolhida para o experimento tem um histórico de cinco anos com o método de plantio direto consolidado. Nos dois anos imediatamente anteriores à condução do experimento, foram realizados testes com milho e sorgo em sucessão. O manejo químico da área contou com 3 aplicações, sendo aos 30, 63 e 74 dias após a semeadura. Os produtos aplicados são detalhados no quadro a seguir:

Tabela 1 — Doses, ingredientes ativos e classe agronômica das três aplicações de manejo químico realizadas

Aplicações	Dose do Produto Comercial	Ingrediente Ativo	Classe Agronômica
Primeira Aplicação	30 g ha ⁻¹	Clorimurom-etílico (250g kg ⁻¹)	Herbicida
	1,5 kg ha ⁻¹	Equivalente ácido de glifosato (720 g kg ⁻¹); glifosato (792,5 g kg ⁻¹)	Herbicida
	600 mL ha ⁻¹	Trifloxistrobina (100 g L ⁻¹); Tebuconazol (200 g L ⁻¹)	Fungicida
	300 g ha ⁻¹	Acetamiprido (250 g kg ⁻¹); Bifentrina (250 g kg ⁻¹)	Inseticida
	120 mL ha ⁻¹	Equivalente ácido de haloxifope-P-metílico (520 g L ⁻¹)	Herbicida
	500 mL ha ⁻¹	Óleo mineral	Adjuvante
Segunda Aplicação	600 mL ha ⁻¹	Trifloxistrobina (100 g L ⁻¹); Tebuconazol (200 g L ⁻¹)	Fungicida
	1,0 kg ha ⁻¹	Acefato (970 g kg ⁻¹)	Inseticida
	100 mL ha ⁻¹	Espinetoram (120 g L ⁻¹)	Inseticida
Terceira Aplicação	500 mL ha ⁻¹	Trifloxistrobina (150 g L ⁻¹); Protiocanazol (175 g L ⁻¹)	Fungicida
	300 g ha ⁻¹	Acetamiprido (250 g kg ⁻¹); Bifentrina (250 g kg ⁻¹)	Inseticida
	100 mL ha ⁻¹	Espinetoram (120 g L ⁻¹)	Inseticida

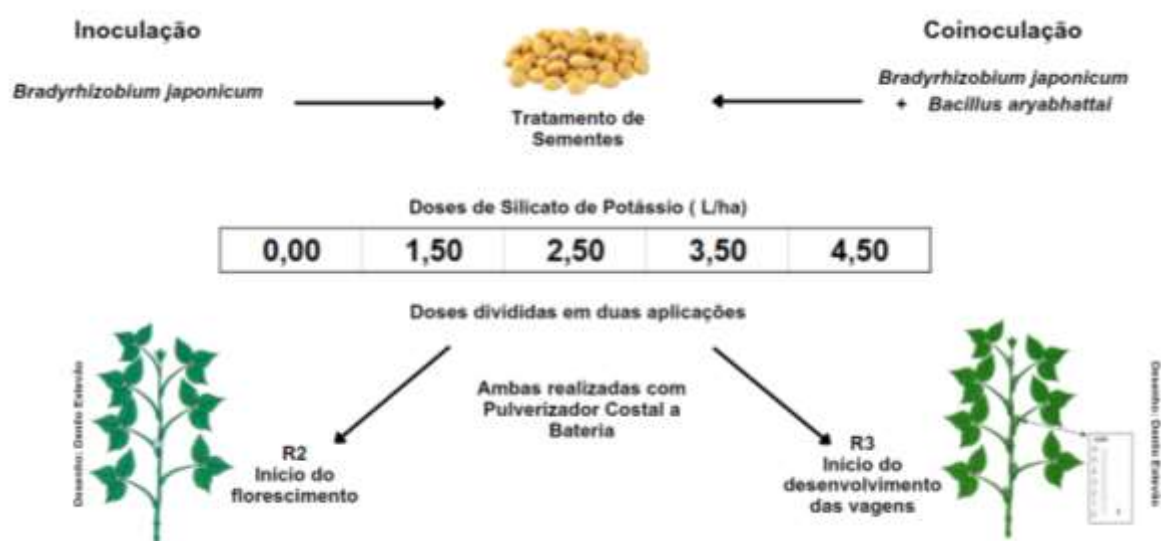
Fonte: Próprio autor

Para a instalação do experimento, utilizou-se dois produtos da marca NOOA para a aplicação dos microrganismos, sendo o BRAFIX® para a inoculação de *Bradyrhizobium japonicum* estirpe SEMIA 5079 e 5080 (5x10⁹ UFC mL⁻¹) e AURAS®

para aplicação de *Bacillus aryabhattai* estirpe CMAA 1363 (1×10^8 UFC mL⁻¹). A aplicação foi realizada via tratamento de sementes (Figura 3), seguindo as doses recomendadas pelo fabricante, as quais foram 2,5 mL para *B. japonicum*, e 2,0 mL para *B. aryabhattai* para cada 1 kg de semente. As sementes utilizadas foram da cultivar NS6700IPRO (ciclo precoce), já tratadas previamente com 2,0 mL Standack Top para cada um quilo de semente, e a semeadura foi realizada mecanicamente com 13 sementes por metro linear. Simultaneamente foi aplicado 330 kg ha⁻¹ do formulado 02- 20- 20 no sulco de semeadura, ou seja, 6,6; 66 e 66 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅ e K₂O, respectivamente.

Foi utilizado o silício na forma de silicato de potássio, apresentando as seguintes características: teor de silício de 12%, teor de K₂O de 15%, densidade de 1,40 g L⁻¹ e pH de 10,96. A aplicação foi realizada via foliar em duas fases distintas da soja, sendo metade da dose aplicada em R2 e a outra metade em R3 (Figura 3). Para a aplicação utilizou-se um volume de 100 litros de calda por hectare, e um pulverizador costal a bateria da marca Jacto, modelo SB, o qual permite pressão e vazão constante. É fundamental destacar que as condições climáticas durante as aplicações foram monitoradas. Ambas as aplicações foram realizadas pela manhã, com ausência de ventos, e com médias de temperatura de 26 e 27°C para a primeira e segunda aplicação, respectivamente.

Figura 3 — Apresentação esquemática dos tratamentos experimentais e suas respectivas formas de aplicação

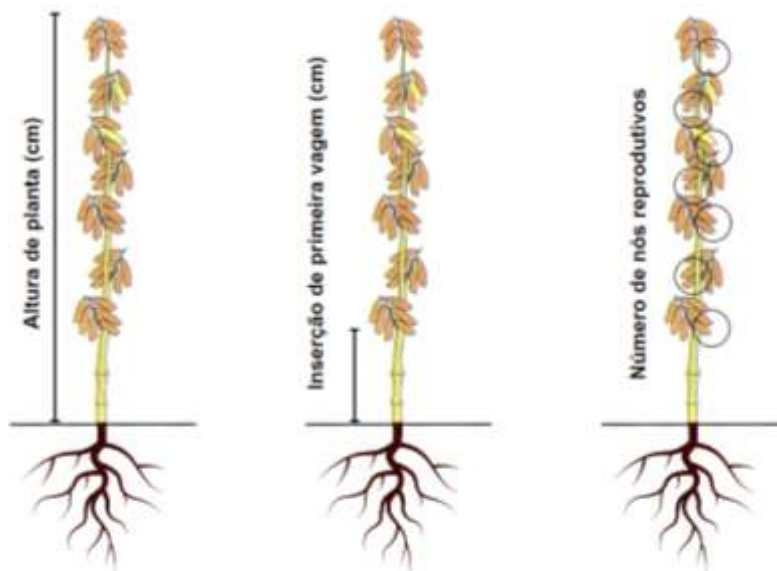


Fonte: Próprio autor

3.4 AVALIAÇÕES

Durante a colheita da soja, foram separadas cinco plantas representativas por parcela para as seguintes avaliações: Altura de planta (cm) (Figura 4); Inserção de primeira vagem (cm) (Figura 4), medida do colo até o nó de emissão da primeira vagem; Número de vagens por planta (Figura 4); Número de grãos por vagem; Número de nós reprodutivos; Massa de 100 grãos (g); Umidade (%), utilizando o medidor de umidade de grãos. Após realizadas as análises, a parte vegetativa das plantas foram colocadas em sacos de papel devidamente identificados e levadas para estufa à temperatura de 65 °C por 72 horas, e pesadas para obtenção de massa seca de parte aérea de cinco plantas, a qual foi extrapolada para kg ha⁻¹ considerando uma população de 200 mil plantas por hectare. A produtividade de grãos foi determinada pela coleta das plantas contidas nas duas linhas úteis centrais de cada parcela. Após a trilha mecânica, os grãos foram pesados, os dados extrapolados em kg ha⁻¹, e corrigidos para 13% de umidade. Após a pesagem, tanto a palha quanto os grãos secos foram submetidos à moagem e, em seguida, encaminhados ao laboratório de nutrição e plantas para a realização de análises visando a determinação das concentrações potássio, segundo a metodologia de Malavolta et al. (1997) e silício, segundo a metodologia de Da Silva et al. (2009).

Figura 4 — Apresentação esquemática detalhando os métodos de análise das variáveis altura de planta (cm), inserção de primeira vagem (cm) e número de nós reprodutivos na soja



Fonte: Adaptado de Daniel Estevão

3.5 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

As análises dos dados foram realizadas por meio do software R versão 4.2.1. (Team, 2020). A hipótese da normalidade foi testada pelo teste de Shapiro-Wilk, realizada a análise de variância (anova) com teste F a 5% de probabilidade para detectar as diferenças dos fatores e da interação. Quando encontrada diferença realizou-se o teste de Regressão Múltipla para detectar o efeito de doses de silicato de potássio.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em relação às concentrações de nutrientes e à massa da palhada (Tabela 2), os resultados indicam que as doses de silicato de potássio e inoculante não tiveram um impacto estatisticamente significativo na concentração de potássio na palhada e nos grãos da cultura de soja. Assim como concentração de silício, que tanto na palhada quanto nos grãos, não apresentou diferenças significativas entre os tratamentos testados, indicando uma possível estabilidade dessas variáveis nas condições estudadas. Em relação à massa da palhada, as médias apresentadas são estatisticamente equivalentes, sugerindo a ausência de um impacto significativo nessa característica sob os tratamentos aplicados.

Tabela 2 — Análise de variância para as variáveis, massa de palhada (MP), concentração de potássio (K) na palhada e nos grãos e concentração de silício (Si) na palhada e nos grãos em função da inoculação e coinoculação de bactérias associadas a doses de silicato de potássio aplicados na soja. Selvíria - MS, 2023

Doses de Silicato de Potássio (L ha⁻¹)	MP kg ha⁻¹	K palhada g kg⁻¹	K grãos g kg⁻¹	Si palhada g kg⁻¹	Si grãos g kg⁻¹
0,00	3795	19,25	18,76	12,70	11,00
1,50	4011	19,63	18,28	12,75	11,30
2,50	3648	18,58	18,66	11,80	11,16
3,50	3526	19,51	18,20	12,00	10,92
4,50	3562	19,20	18,55	11,76	10,91
Inoculação					
<i>B. japonicum</i>	3908	19,54	18,83	12,64	11,00
<i>B. aryabhattai</i> + <i>B. japonicum</i>	3908	18,92	18,70	11,76	11,12
Teste F					
Doses de Silicato de Potássio (D)	ns	ns	ns	ns	ns
Inoculação (I)	ns	ns	ns	ns	ns
D x I	ns	ns	ns	ns	ns
CV (%)	17,37	11,05	1,57	9,41	4,31

Fonte: Próprio autor

Pelo teste F, ** significativo a $p \leq 0.01$, * significativo a $p \leq 0.05$, e ns não significativo

O potássio exerce uma influência crucial nas plantas, afetando diversas enzimas envolvidas em processos vitais como a utilização de energia, síntese de

amido, metabolismo do nitrogênio e respiração, e é reconhecido por seus efeitos benéficos na saúde das plantas (Nelson, Motavalli e Nathan, 2005). Contudo, apesar das variações observadas nas concentrações de potássio, não foi possível identificar um padrão de relação consistente entre essas concentrações e as doses de silicato de potássio testadas.

Ademais, a falta de relação observada sugere que as doses adicionais de potássio, acima das necessárias, também não conferem benefícios adicionais ao vegetal. Isso pode indicar que a quantidade de potássio já presente no solo atende adequadamente às necessidades das plantas, não justificando doses suplementares para promover melhorias adicionais. Em um experimento que empregou cinco doses (0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0) de K_2O foliar, observou-se que a dose de $1,50\text{ kg ha}^{-1}$ de potássio resultou na maior produtividade de grãos de soja. Isso evidencia a ideia de que doses superiores não se traduzem necessariamente em benefícios adicionais ou aumento na produção vegetal (Oliveira; Lopes; Buso, 2023).

Apesar dos solos altamente intemperizados do Cerrado brasileiro apresentarem um déficit de potássio (Silva *et al.*, 2008), o histórico da área em estudo desempenhou um papel crucial na manutenção da alta fertilidade. Com um sistema de plantio direto consolidado por pelo menos cinco anos e práticas regulares de adubação a cada novo ciclo de culturas, a fertilidade do solo é mantida. Destaca-se que as adubações desempenham um papel significativo na preservação da fertilidade, especialmente diante da necessidade de restituição do solo após exportação nutricional pelos grãos (Lopes, 2005), enfatizando a importância desse processo a cada ciclo de cultivo.

Assim, a combinação da presença adequada de K no solo, enraizada nas práticas de manejo sustentável da área estudada, e as condições ideais de umidade resultam não apenas em uma eficiência hídrica otimizada, mas também na maximização do desempenho fisiológico das plantas. Visto que a presença suficiente de K não apenas aprimora a eficiência hídrica, reduzindo a quantidade necessária de água para a produção de massa seca (Nelson, Motavalli e Nathan, 2005), mas também desempenha um papel crucial no funcionamento adequado dos estômatos. Este aspecto é fundamental para processos essenciais como fotossíntese, transporte de água e nutrientes, e regulação térmica, aspectos que podem ser comprometidos em condições de deficiência de K (Nelson, Motavalli e Nathan, 2005).

No que diz respeito ao desenvolvimento das plantas e produtividade da soja (Tabela 3), os resultados revelam que o fator inoculação exerceu uma influência significativa em várias características. A altura das plantas foi influenciada pela coinoculação (*B. japonicum* + *B. aryabhattai*) apresentando uma altura média significativamente maior do que o *B. japonicum* isolado. Além disso, observou-se que a coinoculação promoveu menor número de nós reprodutivos em comparação com a inoculação exclusiva de *B. japonicum*.

Tabela 3 — Análise de variância para as variáveis, vagens por planta (VP), grãos por vagem (GV), massa de cem grãos (MCG), altura de planta (AL), inserção de primeira vagem (IPV), nós reprodutivos (NR) e produtividade de grãos (PROD), em função da coinoculação de bactérias e doses de silicato de potássio aplicados. Selvíria - MS, 2023

Doses de Silicato de Potássio (L ha ⁻¹)	VP	GV	MCG g	AL cm	IPV cm	NR	PROD t ha ⁻¹
0,00	64,25	2,64	2,9	123,23	22,80	24,25	6,39
1,50	62,15	2,68	2,33	123,45	23,20	23,85	6,21
2,50	58,05	2,66	2,53	123,18	24,42	20,85	6,09
3,50	57,00	2,69	2,25	121,15	23,72	21,20	6,01
4,50	61,02	2,64	2,63	122,75	24,77	23,45	6,67
Inoculação							
<i>B. japonicum</i>	67,12 a	26,95	29,0 a	120,44 b	22,36 b	25,40 a	6,42
<i>B. aryabhattai</i> + <i>B. japonicum</i>	53,87 b	26,31	21,5 b	125,06 a	25,21 a	20,04 b	6,13
Significância do teste F							
Doses de Silicato de Potássio (D)	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Inoculação (I)	*	ns	*	**	**	**	ns
D x I	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns
CV (%)	30,89	9,77	4,23	5,68	24,89	36,52	16,16

Fonte: Próprio autor

Pelo teste F, ** significativo a $p \leq 0.01$, * significativo a $p \leq 0.05$, e ns não significativo

Contrariando expectativas anteriores, a maior altura das plantas não se correlacionou positivamente com o número de nós reprodutivos, sugerindo que plantas mais altas podem produzir menos nós reprodutivos, o que gera preocupações pois, além de possuírem menos nós, pode acarretar menor produtividade, plantas

mais altas estão sujeitas a um maior risco de acamamento, o que poderia resultar em perdas.

O número de vagens por planta diferiu estatisticamente em relação ao tipo de inoculante, com a inoculação isolada demonstrando uma quantidade superior de vagens por planta. Isso corrobora a observação de que um maior número de nós reprodutivos está associado a uma maior produção de vagens por planta. Além disso, a massa de cem grãos, uma métrica crucial para avaliar a produção dos grãos, também apresentou uma média maior quando inoculada apenas com *B. japonicum*.

Resultados diferentes foram observados ao aplicar a coinoculação em pulverização de área total durante o estágio V2, a combinação de *B. japonicum* em tratamento de sementes com *B. aryabhattai* em pulverização resultou em uma massa de 100 grãos maior e, em média, cinco vagens adicionais por planta em comparação com a inoculação isolada de *B. japonicum* (Carvalho, 2023). Embora a variável de vagens por planta não tenha mostrado diferença estatística entre esses tratamentos, a extrapolação para a produtividade revelou um aumento de 9%. Esses resultados distintos podem ser atribuídos à forma de aplicação, uma vez que o uso da coinoculação com *B. aryabhattai* na soja é relativamente recente, e métodos mais eficazes de aplicação ainda precisam ser identificados para garantir o máximo aproveitamento do inoculante.

Embora exista diferenças significativas no número de vagens por planta e na massa de cem grãos, é importante notar que a quantidade de grãos por vagem e a produtividade de grãos não revelaram diferenças significativas entre si. É importante destacar que, embora não tenhamos encontrado diferenças estatísticas na produtividade da soja, notou-se uma média de 290 kg, ou cerca de 5 sacas por hectare, de diferença entre os tratamentos de inoculação. Isso nos leva a considerar a possibilidade de efeitos antagônicos entre as bactérias quando aplicadas em conjunto, uma vez que a inoculação individual resultou em uma produtividade superior. Estudos anteriores já afirmaram a produção de antibióticos naturais por microrganismos promotores de crescimento (Du Jardin, 2015), tal competitividade é influenciada por diversos fatores, relacionados com os genótipos das bactérias, da planta hospedeira e fatores ambientais (Streeter, 1994).

As bactérias do gênero *Bacillus* são geralmente consideradas BPCPs, devido à sua capacidade de colonizar a rizosfera e estimular o crescimento vegetal (Kundan *et al.*, 2015). No entanto, a baixa resposta observada na coinoculação com *B.*

aryabhattai pode ser atribuída ao elevado índice pluvial durante a condução do experimento. Vale ressaltar que a bactéria *B. aryabhattai* é originária do bioma Caatinga, onde algumas comunidades microbianas sofrem alterações significativas durante as fases de seca e chuvas (Ferreira, 2014). Essas mudanças sazonais podem ter contribuído para a diminuição da presença dessa bactéria no local experimental, explicando assim a resposta menos expressiva na coinoculação da soja.

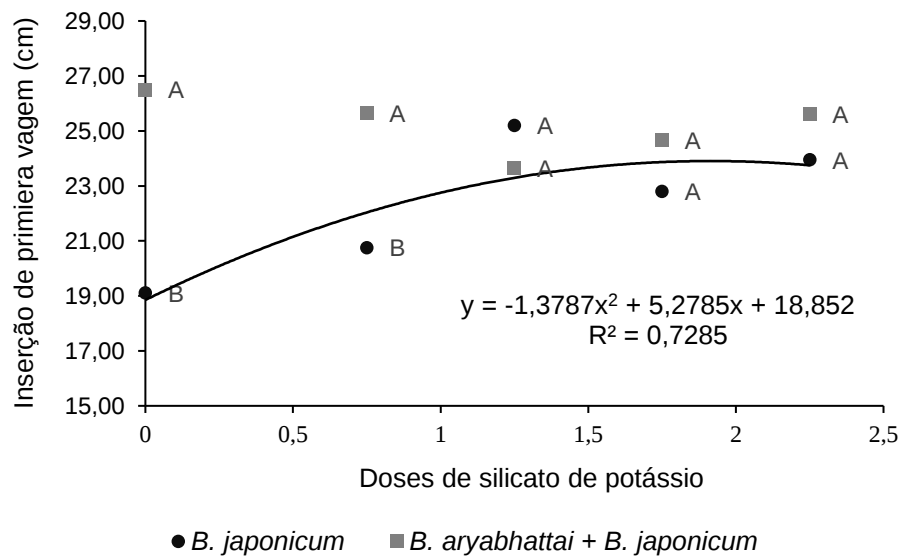
O mesmo padrão se aplica às doses de silício, em que a produtividade de grãos de soja não foi influenciada pelas doses de silicato de potássio aplicadas via foliar. Contudo, ressalta-se que a dose mais alta desse silicato resultou em um aumento de 10% na média da produtividade, podendo ser resultado de uma maior resistência das plantas a fatores abióticos e bióticos. O aumento de produtividade na soja já foi observado em estudos anteriores, nos quais se registrou um aumento médio de 19 sacas ha^{-1} em plantas que receberam três doses de silicato de potássio (15% de K_2O e 10% de Si) foliar, sob condições de sequeiro com precipitação média de 75,2 mm de chuva no estágio vegetativo e 98,77 mm no estágio reprodutivo da soja (Reis Moreira, dos *et al.*, 2010). Portanto, no presente estudo, a quantidade e regime de chuvas explicam por que não houve efeito significativo para doses de silicato de potássio via foliar na soja.

Com relação à altura de inserção da primeira vagem, houve efeito significativo da interação entre as doses de silício e os inoculantes, com um ajuste a regressão quadrática observado somente no tratamento com *B. japonicum* isolado (Figura 6). A altura de inserção da primeira vagem é uma característica importante na arquitetura da planta de soja. Alturas de inserção mais altas podem tornar colheita mecanizada mais eficiente (Cartter e Hartwig, 1962). No entanto, para cultivares com altura de planta igual ou superior a 65 cm e ponto de inserção das primeiras vagens igual ou superior a 10 cm, são suficientes para a realização da colheita mecânica (Bonetti, 1983).

Na análise da curva de regressão, observa-se um aumento gradual na altura de inserção da primeira vagem à medida que a dose de silicato de potássio aumenta. Notavelmente, o tratamento que não recebeu aplicação de silicato de potássio apresentou uma média de 19,00 cm de altura para a inserção da primeira vagem. Em contraste, o ponto de maior altura média de inserção, que atingiu cerca de 22,06 cm, foi registrado com uma dose de 1,9 L ha^{-1} , conforme calculado pela equação de regressão. É importante destacar que, após esse ponto de pico, a curva de regressão

apresenta um declínio gradual na altura de inserção da primeira vagem com doses de silicato de potássio mais elevadas. Essa tendência sugere uma resposta otimizada em doses moderadas.

Figura 6 — Desdobramento para a variável inserção de primeira vagem de soja em função da coinoculação de bactérias e doses de silicato de potássio aplicados. Selvíria – MS, 2023.



Fonte: Próprio autor

No decorrer deste estudo, a ausência de respostas positivas em diversas variáveis analisadas pode ser atribuída às condições ambientais favoráveis durante o ciclo de cultivo da soja. É crucial salientar que o silício é amplamente reconhecido por sua capacidade de melhorar a resistência das plantas diante de situações estressantes, como déficit hídrico, assim como o potencial impacto positivo do *B. aryabhattai*. Contudo, no presente experimento, as condições climáticas foram propícias, caracterizadas por uma adequada disponibilidade de água e temperaturas apropriadas. Além disso, a adequada fertilidade do solo e suprimento de nutrientes podem explicar por que não houve efeito dos tratamentos na produtividade da soja. A combinação de uma alta fertilidade do solo e um regime hídrico apropriado também pode ter mascarado os efeitos dos tratamentos utilizados nesta pesquisa.

Importa ressaltar que esses resultados são pertinentes às condições específicas de cultivo observadas. Entretanto, a repetição do experimento em diferentes anos agrícolas, especialmente em cultivos que tenham períodos de veranicos ou estiagem, pode fornecer informações adicionais sobre como as condições climáticas afetam a resposta da cultura de soja à aplicação de silício e coinoculação com *B. aryabhattai*.

5 CONCLUSÃO

O *Bradyrhizobium japonicum* e *Bacillus aryabhattai* coinoculados resultou em maior altura de planta, mas menor número de nós reprodutivos em comparação com a inoculação com *B. japonicum*.

A inoculação com *B. japonicum* resultou em aumento significativo no número de vagens por planta e na massa de cem grãos de soja.

A coinoculação com *B. japonicum* e *B. aryabhattai*, assim como as doses de silicato de potássio via foliar, não influenciaram as concentrações de K e Si na palhada e grãos, e a produtividade de grãos de soja nas condições estudadas (alta fertilidade do solo e precipitação pluvial não limitante).

REFERÊNCIAS

- BENEDUZI, A.; AMBROSINI, A.; PASSAGLIA, L. M. P. Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): their potential as antagonists and biocontrol agents. **Genetics and Molecular Biology**, Ribeirao Preto, v. 35, p. 1044–1051, 2012.
- BONETTI, L. P. Cultivares e seu melhoramento genético. **Soja: genética e melhoramento**. Campinas: Fundação Cargill, p. 741–794, 1983.
- Canal CLIMA da UNESP Ilha Solteira**. Disponível em: <http://clima.feis.unesp.br/>. Acesso em: 18 jan. 2024.
- CARGNELUTTI, D.; BAMPI, E.; MELO SANTIAGO, G. DE; LUZ, V. C. DA; GARBIN, E.; CASTAMANN, A.; MOSSI, A. J. Soluções tecnológicas emergentes para uma agricultura sustentável: microrganismos eficientes. *In*: García, L. M. H. **Agroecologia: princípios e fundamentos ecológicos aplicados na busca de uma produção sustentável**, Canoas: Mérida Publishers, 2021. p. 31–62.
- CARTTER, J. L.; HARTWIG, E. E. The Management Of Soybeans. *In*: NORMAN, A. G. (Ed.). **Advances in Agronomy**. [S.l.]: Academic Press, 1962. v. 14. p. 359-412.
- CARVALHO, R. C. DA S. Co-inoculação com microrganismos promotores de crescimento de plantas no desenvolvimento e produtividade da soja. 2023.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. Boletim da Safra de Grãos. **Acomp. safra brasileira de grãos**, Brasília, DF, v.10 – Safra 2022/23, n.12 - Décimo segundo levantamento, p. 1-111, setembro 2023. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>. Acesso em: 18 jan. 2024.
- DATNOFF, L. E.; RODRIGUES, F. A.; SEEBOLD, K. W. Silicon and plant disease. *In*: DATNOFF, L. E.; ELMER, W. H.; HUBER, D. M. (eds.). **Mineral nutrition and plant disease**. St. Paul: APS Press, 2001.
- DIAZ, P. A. E.; BARON, N. C.; RIGOBELLO, E. C. “*Bacillus*” spp. as plant growth-promoting bacteria in cotton under greenhouse conditions. **Australian Journal of Crop Science**, [S. l.], v. 13, n. 12, p. 2003–2014, dez. 2019.

DOS REIS MOREIRA, A. *et al.* Resposta da cultura de soja a aplicação de silício foliar. **Bioscience Journal**, [S. l.], v. 26, n. 3, p. 413–423, 2010.

DU JARDIN, P. Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation. **Scientia horticultrae**, [S. l.], v. 196, p. 3–14, 2015.

FERREIRA, C. **Dinâmica do microbioma da rizosfera de mandacaru na Caatinga**. Piracicaba: Universidade de São Paulo, 28 fev. 2014.

GAARDER, J. **O mundo de Sofia**: romance da história da filosofia. São Paulo: Editora Companhia das Letras, 2012.

GUNTZER, F.; KELLER, C.; MEUNIER, J. D. Benefits of plant silicon for crops: a review. **Agronomy for Sustainable Development**, [S. l.], v. 32, n. 1, p. 201-213, 2012.

HUANG, H.; LI, M.; RIZWAN, M.; DAI, Z.; YUAN, Y.; HOSSAIN, M. M.; CAO, M.; XIONG, S.; TU, S. Synergistic effect of silicon and selenium on the alleviation of cadmium toxicity in rice plants. **Journal of Hazardous Materials**, [S. l.], v. 401, p. 123393, 2021.

HUNGRIA, M.; CAMPO, R. J.; MENDES, I. C. **A importância do processo de fixação biológica do nitrogênio para a cultura da soja**: componente essencial para a competitividade do produto brasileiro. Londrina: Embrapa Soja, 2007. (Embrapa Soja. Documentos, 283).

HUNGRIA, M.; FRANCHINI, J. C. Bactérias diazotróficas endofíticas. *In*: HUNGRIA, M.; ARAUJO, R. S. (Eds.). Manual de métodos empregados em estudos de microbiologia agrícola. [S. l.]: Embrapa, 2010. p. 463-588.

ISLAM, W.; TAYYAB, M.; KHALIL, F.; HUA, Z.; HUANG, Z.; CHEN, H. Y. Silicon-mediated plant defense against pathogens and insect pests. **Pesticide Biochemistry and Physiology**, Maryland Heights, v. 168, p. 104641, 2020.

KÖPPEN, W.; GEIGER, R. *Klimate der erde*. **Gotha**: verlag justus perthes. Wall-map 150cmx200cm, p. 91–102, 1928.

KOU-GIESBRECHT, S.; MENGE, D. Nitrogen-fixing trees could exacerbate climate change under elevated nitrogen deposition. **Nature Communications**, [S. l.], v. 10, n. 1, p. 1493, 2019.

KUNDAN, R.; PANT, G.; JADON, N.; AGRAWAL, P. Plant Growth Promoting Rhizobacteria: Mechanism and Current Prospective. **Journal of Fertilizers & Pesticides**, v. 06, 1 jan. 2015.

LOBELL, D. B.; ASNER, G. P. Climate and management contributions to recent trends in US agricultural yields. **Science**, [S. l.], v. 299, n. 5609, p. 1032-1032, 2003.

LOBELL, D. B.; BURKE, M. B. On the use of statistical models to predict crop yield responses to climate change. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 150, n. 11, p. 1443-1452, 2010.

LOPES, A. S. Reservas de minerais potássicos e produção de fertilizantes potássicos no Brasil. **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba: Potafos, 2005. p. 21-32.

MACEDO, N.; OLIVEIRA, M. C. N. DE; HIGLEY, L. G. **Impacto das mudanças climáticas na produção de soja**. Embrapa Soja. 2018. Documentos (Embrapa Soja, 399.).

MAUAD, M.; CRUSCIOL, C. A. C.; NASCENTE, A. S.; GRASSI FILHO, H.; LIMA, G. P. P. Effects of silicon and drought stress on biochemical characteristics of leaves of upland rice cultivars. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 47, p. 532–539, 2016.

MEYER, M. C. **Bioinsumos na cultura da soja**. Brasília, DF: Embrapa, 2022.

MORAES, L. A. B. DE et al. Soja: cultivo e produção de biodiesel. In: FARIA-MACHADO, A. F.; ZAMBON, M. (Eds.). **Biocombustíveis: Produção, Propriedades e Impactos Socioambientais**. Blucher, 2019.

NELSON, K. A.; MOTAVALLI, P. P.; NATHAN, M. Response of No-Till Soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] to Timing of Preplant and Foliar Potassium Applications in a Claypan Soil. **Agronomy Journal**, [S. l.], v. 97, n. 3, p. 832–838, maio 2005.

OLIVEIRA, L. DE; CASTRO, N. DE. Ocorrência de sílica nas folhas de *Curatella americana* L. e de *Davilla elliptica* St. Hil. **Journal of Horticultural Science**, Abingdon, v. 1, p. 1–16, 2002.

OLIVEIRA, F. F.; LOPES, W. D. O.; BUSO, W. H. D. Aplicação de potássio via foliar em diferentes doses e épocas na cultura da soja foliar. **Revista Mirante**, Anápolis, v. 16, n. 4, p. 289-300, dez. 2023. Disponível em: <https://www.revista.ueg.br/index.php/mirante/article/view/14570/10043>. Acesso em: 18 jan. 2024.

REIS MOREIRA, A. DOS; FAGAN, E. B.; MARTINS, K. V.; SOUZA, C. H. E. DE. Resposta da cultura de soja a aplicação de silício foliar. **Bioscience Journal**, [S. l.], v. 26, n. 3, p. 413–423, 2010.

RODRIGUES, F. A. et al. Silicon enhances the accumulation of diterpenoid phytoalexins in rice: a potential mechanism for blast resistance. **Phytopathology**, [S. l.], v. 105, n. 2, p. 246-254, 2015.

SANTOS, H. DOS; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. DOS; OLIVEIRA, V. DE; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. DE; ARAUJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. DE; CUNHA, T. J. F. **Sistema de Classificação de solos**. Brasília: Embrapa Solos, 2018.

SANTOS, M. S.; NOGUEIRA, M. A.; HUNGRIA, M. Outstanding impact of *Azospirillum brasilense* strains Ab-V5 and Ab-V6 on the Brazilian agriculture: Lessons that farmers are receptive to adopt new microbial inoculants. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 45, p. e0200128, 2021.

SILVA, V. A.; MARCHI, G.; GUILHERME, L. R. G.; LIMA, J. M. DE; NOGUEIRA, F. D.; GUIMARÃES, P. T. G. Kinetics of K release from soils of Brazilian coffee regions: effect of organic acids. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 533–540, 2008.

SILVA, A. L. S. DA; FURLANETTO, V. H. DE A.; LAGO, B. C. Influência dos fatores climáticos no rendimento de grãos de soja em São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v. 77, n. 1, p. 109-118, 2018.

SILVA, J. M. DA; UCHÔA, S. C. P. Soja: história, importância econômica e sua aplicação na alimentação. **Revista Brasileira de Pesquisa em Ciências da Saúde**, [S. l.], v. 21, n. 3, p. 215-221, 2019.

STAGNARI, F. et al. Multiple benefits of legumes for agriculture sustainability: an overview. **Chemical and Biological Technologies in Agriculture**, Heidelberg, v. 4, n. 1, p. 2, dez. 2017.

STREETER, J. G. Failure of inoculant rhizobia to overcome the dominance of indigenous strains for nodule formation. **Canadian Journal of Microbiology**, Ottawa, v. 40, n. 7, p. 513–522, 1 jul. 1994.

TEAM, R. C. R Core Team R: a language and environment for statistical computing. Vienna: Foundation for Statistical Computing, 2020.

TELLES, T. S.; NOGUEIRA, M. A.; HUNGRIA, M. Economic value of biological nitrogen fixation in soybean crops in Brazil. **Environmental Technology & Innovation**, v. 31, p. 103158, ago. 2023.

THORNTON, P. E. et al. Influence of carbon-nitrogen cycle coupling on land model response to CO₂ fertilization and climate variability. **Global Biogeochemical Cycles**, Hoboken, v. 21, n. 4, p. 2006GB002868, dez. 2007.

VAN RAIJ, B. *et al.* **Os métodos de análise química do sistema IAC de análise de solo no contexto nacional**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2001. p. 5-39.

VIEIRA, R. F. **Ciclo do nitrogênio em sistemas agrícolas**. [s.l.] Embrapa, 2018.

ZHAO, Y.; GUAN, D.; LIU, X.; GAO, G.-F.; MENG, F.; LIU, B.; XING, P.; JIANG, X.; MA, M.; CAO, F. Profound change in soil microbial assembly process and co-occurrence pattern in co-inoculation of *Bradyrhizobium japonicum* 5038 and *Bacillus aryabhattai* MB35-5 on soybean. **Frontiers in Microbiology**, Lausanne, v. 13, p. 846359, 2022.