

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ

CAMPUS DE MARECHAL CANDIDO RONDON

FERNANDO MATEUS GERLING

**CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS E TROCAS GASOSAS DA
SOJA COINOCULADA COM BACTÉRIAS PROMOTORAS DE
CRESCIMENTO VEGETAL E APLICAÇÃO DE BIOESTIMULANTES**

MARECHAL CÂNDIDO RONDON - PARANÁ

2025

FERNANDO MATEUS GERLING

**CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS E TROCAS GASOSAS DA SOJA
COINOCULADA COM BACTÉRIAS PROMOTORAS DE CRESCIMENTO VEGETAL
E APLICAÇÃO DE BIOESTIMULANTES**

Dissertação de mestrado apresentada
à Universidade Estadual do Oeste do
Paraná, como parte das exigências do
Programa de Pós-Graduação em
Agronomia, para obtenção do título
de Magister Scientiae.

Orientador: Prof. Dr. Vandeir
Francisco Guimarães
Coorientador: Dr. Jeferson Klein

MARECHAL CÂNDIDO RONDON - PARANÁ

2025

Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da Unioeste.

Gerling, Fernando Mateus
CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS E TROCAS GASOSAS DA SOJA
COINOCULADA COM BACTÉRIAS PROMOTORAS DE CRESCIMENTO VEGETAL E
APLICAÇÃO DE BIOESTIMULANTES / Fernando Mateus Gerling;
orientador Vandeir Francisco Guimarães; coorientador
Jeferson Klein. -- Marechal Cândido Rondon, 2025.
83 p.

Dissertação (Mestrado Acadêmico Campus de Marechal
Cândido Rondon) -- Universidade Estadual do Oeste do Paraná,
Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em
Agronomia, 2025.

1. Soja. 2. PGPB. 3. Coinoculação. 4. Bioestimulantes. I.
Guimarães, Vandeir Francisco, orient. II. Klein, Jeferson,
coorient. III. Título.

**unioeste**

Universidade Estadual do Oeste do Paraná

Campus de Marechal Cândido Rondon - CNPJ 78680337/0003-46

Rua Pernambuco, 1777 - Centro - Cx. P. 91 - <http://www.unioeste.br>

Fone: (45) 3284-7878 - Fax: (45) 3284-7879 - CEP 85960-000

Marechal Cândido Rondon - PR.

**PARANÁ**

GOVERNO DO ESTADO

FERNANDO MATEUS GERLING

Características morfológicas e trocas gasosas da soja coinoculada com bactérias promotoras de crescimento vegetal e aplicação de bioestimulantes

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Agronomia, área de concentração Produção Vegetal, linha de pesquisa Manejo de Culturas, APROVADO pela seguinte banca examinadora:



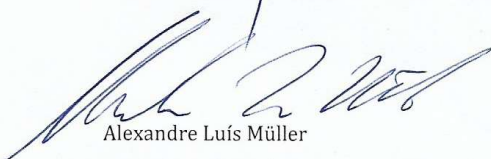
Orientador - Vandeir Francisco Guimarães

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Marechal Cândido Rondon (UNIOESTE)



Paulo Sérgio Rabello de Oliveira

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Marechal Cândido Rondon (UNIOESTE)



Alexandre Luís Müller

Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUC-PR)

Marechal Cândido Rondon, 29 de agosto de 2025

Aos meus pais, Adima Gerling e Zuleica Gerling, pelo amor incondicional, pelos ensinamentos de caráter, esforço e honestidade, e por estarem sempre presentes com apoio, carinho e fé, mesmo nos momentos mais difíceis. meu profundo agradecimento por serem base sólida e inspiração constante para seguir e vencer mais essa etapa.

DEDICO

AGRADECIMENTO

Agradeço a Deus, criador e sustentador de toda a vida, pela força, sabedoria e propósito concedidos ao longo desta jornada, permitindo a realização de mais esta etapa.

À minha família, pelo amor incondicional, pelo exemplo de caráter, ética e dedicação. Por nunca deixarem faltar apoio, mesmo diante das dificuldades, e por manterem sempre o lar como um lugar de união, segurança e fé.

Ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia (PPGA) da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, pela oportunidade de formação e crescimento científico.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Vandeir Francisco Guimarães, e ao meu coorientador, Prof. Dr. Jeferson Klein, pela orientação paciente e firme, pelo exemplo de conduta acadêmica e humana, e por transmitirem com clareza e entusiasmo os fundamentos da pesquisa científica. Suas atuações foram essenciais para a consolidação desta etapa.

Aos professores do PPGA, pelas contribuições valiosas em sala de aula e durante o processo formativo, que ultrapassaram os limites do conteúdo técnico.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo fomento à pesquisa, por meio da concessão da bolsa de estudos.

Aos integrantes e amigos do Grupo de Estudos em Fisiologia da Promoção do Crescimento em Plantas (GEFIP), pelo apoio técnico, intelectual e emocional. Ao Grupo de Estudos em Matologia do Oeste do Paraná (GEMOP), em especial ao Prof. Dr. Neumárcio Vilanova da Costa, pelo espaço cedido na casa de vegetação para a realização do experimento. Ao Núcleo de Estação Experimental (NEE-Unioeste), pelo suporte e pela área disponibilizada para a condução do experimento a campo.

Aos colegas e amigos que compartilharam comigo este ciclo, pelos momentos de aprendizado, apoio e convivência. A todos que, de alguma forma, contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho, deixo aqui minha sincera gratidão.

"A mente que se abre a uma nova ideia jamais volta ao seu tamanho original."

[Albert Einstein]

RESUMO

GERLING, Fernando, M. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, (mês) 2025. **Características biométricas e trocas gasosas de soja inoculadas com coinoculadas com bactérias promotoras de crescimento vegetal e aplicação de bioestimulantes**. Orientador: Prof. Dr. Vandeir Francisco Guimarães. Coorientador: Dr. Jeferson Klein.

A soja (*Glycine max* [L.] Merrill) desempenha papel estratégico na agricultura brasileira, destacando-se como principal cultura de exportação e base para a produção de proteína e óleo vegetal. Frente à previsão de aumento global de até 110% na demanda por soja até 2050, desafios como variabilidade climática, dependência de fertilizantes importados e estabilidade fisiológica das plantas exigem alternativas sustentáveis que otimizem a eficiência metabólica da cultura. Dentre essas estratégias, destaca-se o uso de bactérias promotoras de crescimento vegetal (BPCV) e bioestimulantes, capazes de atuar sobre o desenvolvimento morfofisiológico e favorecer a resiliência da planta. O objetivo do estudo foi avaliar os efeitos da coinoculação com BPCV e da aplicação foliar de bioestimulantes sobre características biométricas, fisiológicas e produtivas da soja. No primeiro experimento, conduzido a campo com a cultivar 64I61RSF IPRO, utilizou-se inoculação com *Bradyrhizobium japonicum* associada à coinoculação com *Azospirillum brasilense*, *Pseudomonas fluorescens* e espécies de *Bacillus*. Foram avaliadas altura de planta, diâmetro do caule, massa seca de folhas, caule e raiz, área foliar, número de nódulos, índice SPAD e trocas gasosas. Os tratamentos coinoculados apresentaram desempenho superior em variáveis vegetativas e fisiológicas em comparação ao controle. *A. brasilense* favoreceu maior razão raiz/parte aérea, enquanto *Bacillus* influenciou positivamente a condutância estomática, a concentração interna de CO₂ e a eficiência do uso da água. No segundo experimento, realizado em ambiente protegido com a cultivar M5947, avaliou-se a interação entre a coinoculação com *A. brasilense* e a aplicação de bioestimulantes foliares: regulador vegetal, silício e aminoácidos. As variáveis analisadas incluíram características biométricas, índice SPAD, trocas gasosas e componentes da produção. A associação entre regulador vegetal e *A. brasilense* resultou ganhos em área foliar, massa seca total e eficiência fotossintética. O silício aumentou a densidade radicular e proporcionou equilíbrio das variáveis fisiológicas relacionadas às trocas gasosas, contribuindo para o funcionamento eficiente e regulado da planta, enquanto os aminoácidos promoveram maior densidade foliar e acúmulo de biomassa em folhas. No entanto, tais efeitos fisiológicos não se traduziram em incrementos significativos nos componentes da produção. Os resultados indicam que a coinoculação com BPCV, especialmente com *A. brasilense*, combinada com bioestimulantes, constitui estratégia promissora para otimizar a eficiência fisiológica da soja, promovendo maior crescimento vegetativo e respostas benéficas sob diferentes condições de cultivo. Tais práticas apresentam potencial para integrar sistemas agrícolas mais eficientes e sustentáveis, com menor dependência de insumos químicos e maior estabilidade produtiva.

Palavras-Chaves: *Glycine max* L.; associação; BPCV; bioinsumos

ABSTRACT

GERLING, Fernando, M. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2025. **Morphometric Traits and Gas Exchange in Soybean Co-inoculated with Plant Growth-Promoting Bacteria and Treated with Biostimulants.** Supervisor: Vandeir Francisco Guimarães. Co-supervisor: Jeferson Klein.

Soybean (*Glycine max* [L.] Merrill) plays a strategic role in Brazilian agriculture, standing out as the main export crop and a key source of vegetable protein and oil. Given the projected global increase of up to 110% in soybean demand by 2050, challenges such as climate variability, dependence on imported fertilizers, and physiological stability of plants call for sustainable alternatives to optimize the crop's metabolic efficiency. Among these strategies, the use of plant growth-promoting bacteria (PGPB) and foliar-applied biostimulants is noteworthy, as they influence morphophysiological development and enhance plant resilience. This study aimed to evaluate the effects of co-inoculation with different PGPB strains and foliar application of biostimulants on soybean biometric, physiological, and reproductive characteristics. The first field experiment, conducted with the cultivar 64I61RSF IPRO, involved inoculation with *Bradyrhizobium japonicum* combined with co-inoculation of *Azospirillum brasilense*, *Pseudomonas fluorescens*, and *Bacillus* spp. Variables assessed included plant height, stem diameter, dry mass of leaves, stem, and roots, leaf area, number of nodules, SPAD index, and gas exchange. Co-inoculated treatments showed superior performance in vegetative and physiological traits compared to the control. *A. brasilense* promoted a higher root-to-shoot ratio, while *Bacillus* positively influenced stomatal conductance, internal CO₂ concentration, and water use efficiency. The second experiment, conducted under protected conditions using the cultivar M5947, evaluated the interaction between *A. brasilense* co-inoculation and foliar application of biostimulants: plant growth regulator, silicon, and amino acids. Variables included biometric characteristics, SPAD index, gas exchange, and yield components. The combination of plant growth regulator and *A. brasilense* resulted in the highest values for leaf area, total dry mass, and photosynthetic efficiency. Silicon increased root density and provided greater physiological stability, while amino acids enhanced leaf density and biomass accumulation in leaves. However, these physiological effects were not reflected in significant improvements in reproductive components. The results indicate that co-inoculation with PGPB, especially *A. brasilense*, combined with biostimulant application, constitutes a promising strategy to enhance soybean physiological efficiency, promoting greater vegetative growth and beneficial responses under different cultivation conditions. These practices have the potential to contribute to more efficient and sustainable agricultural systems, with reduced reliance on chemical inputs and increased yield stability.

Keywords: *Glycine max* L.; Coinoculation; PGPR; Bioinputs

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	11
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA GERAL	14
4. CAPÍTULO 1: CARACTERÍSTICAS BIOMÉTRICAS E TROCAS GASOSAS DE SOJA COINOCULADAS COM BACTÉRIAS PROMOTORAS DE CRESCIMENTO VEGETAL.....	21
4.1. INTRODUÇÃO	22
4.2. MATERIAL E MÉTODOS	24
4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	27
4.4. CONCLUSÕES	48
4.5. REFERÊNCIAS.....	48
5. CAPÍTULO 2: RESPOSTAS DA SOJA À COINOCULAÇÃO COM <i>Azospirillum brasilense</i>, ASSOCIADAS À APLICAÇÃO FOLIAR DE BIOESTIMULANTES.....	54
5.1. INTRODUÇÃO	55
5.2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	57
5.3. RESULTADOS E DISCUSSÕES	61
5.4. CONCLUSÃO	78
5.5. REFERÊNCIAS.....	78
6. CONCLUSÕES GERAIS	83

1. INTRODUÇÃO GERAL

A soja (*Glycine max* L.) é uma das commodities agrícolas mais importantes no cenário mundial, com produção que atingiu 371,17 milhões de toneladas em 2023, concentrando 84,17% desse volume na América (OUR WORLD IN DATA, 2023). O crescimento da demanda por alimentação, nutrição animal e biocombustíveis projeta um aumento de até 110% na produção até 2050 (CARCIOCHI et al., 2019). O Brasil lidera esse mercado, superando em 38,8 milhões de toneladas a produção dos Estados Unidos, em 127,1 milhões de toneladas a da Argentina e em 132,7 milhões de toneladas da China, sendo responsável por 59,3% das exportações agropecuárias brasileiras em 2024 (FAOSTAT, 2025; SECRETARIA DO COMÉRCIO EXTERIOR, 2025).

Além do impacto no comércio exterior, a soja tem grande importância para as economias regionais. Em 2023, O Paraná destina-se 5,6 milhões de hectares para a cultura, produzindo cerca de 21,6 milhões toneladas e alcançando um valor de produção em R\$ 51,3 bilhões, representando aproximadamente 58,1% da produção da região sul (IBGE, 2023).

Apesar desse protagonismo, a cultura vem enfrentando desafios relacionados a variabilidade climática e a dependência de insumos externos. A safra 2023/2024 no Paraná, por exemplo, foi impactada negativamente por condições climáticas adversas, resultando na redução da produtividade. Na safra 2024/2025 mostrou-se controverso, com 90% das lavouras em boas condições. Mostrando a inconstância dos regimes pluviométricos e nos padrões de temperatura (MORAIS et al., 2025). E ainda, a dependência brasileira de fertilizantes sintéticos é um entrave, em função da acidez natural dos solos, na qual exige volumes elevados de importação, especialmente de fertilizantes potássicos e nitrogenados, os quais posicionam o Brasil em 2024, como o quarto maior importador mundial (TABOSA et al., 2024; BRASIL, 2022).

A Fixação Biológica de Nitrogênio (FBN) na cultura da soja representa um dos grandes avanços da agricultura brasileira em sustentabilidade e economia. De acordo com Hungria e Nogueira (2019), o Brasil é o mais avançado do mundo na utilização da tecnologia em soja, permitindo uma redução significativa do uso de fertilizantes nitrogenados. Em 2017, estima-se que cerca de 13 bilhões de dólares deixaram de ser gastos com a fertilizantes nitrogenados em função do uso eficiente de inoculantes microbianos na cultura.

Além da FBN, a otimização do crescimento vegetal é potencializada por outras abordagens biotecnológicas sustentáveis, como o uso de bactérias promotoras de crescimento vegetal (BPCV)

e bioestimulantes. Essas estratégias complementam a ação dos microrganismos fixadores de nitrogênio, promovendo não apenas a nutrição da planta, mas também sua eficiência fisiológica e produtiva. A rizosfera é altamente favorável à proliferação microbiana devido a liberação de exsudatos radiculares, na qual regulam o ambiente de atuação das BPCV (RAMAKRISHNA; YADAV; LI, 2019). Esses microrganismos promovem o crescimento vegetal, seja pela solubilização e disponibilização de nutrientes, seja pela síntese de fitohormônios na qual influencia diretamente o desenvolvimento da planta (SANSINENEA, 2019).

A adoção da inoculação tem potencializado a produtividade da soja. Contudo, os efeitos dessas bactérias são modulados por fatores relacionados ao perfil metabólico de cada cepa, às condições edafoclimáticas, manejo adotado e as características da planta (LOPES et al., 2021), o que evidencia que distintas condições geram comportamentos variados das plantas de interesse econômico. Em virtude das interações entre as comunidades microbianas residente na rizosfera e os exsudatos radiculares são altamente específicas, influenciando a dinâmica das populações bacterianas e, conseqüentemente, o desempenho fisiológico da cultura (RAMAKRISHNA; YADAV; LI, 2019).

Entre os grupos de BPCV amplamente utilizados destaca-se o gênero *Bacillus*, que exerce impacto significativo não apenas na promoção do crescimento, mas também na indução de resistência a estresses bióticos, através da produção de metabólitos antimicrobianos, biosurfactantes e enzimas que limitam a ação de patógenos (SANSINENEA, 2019). Esses microrganismos estimulam processos fisiológicos nas plantas, como a síntese de hormônios e a modulação do desenvolvimento radicular e foliar, elevando a eficiência no uso de recursos necessários para o desenvolvimento vegetal e favorecendo a resiliência frente as condições adversas.

Paralelamente, o manejo com bioestimulantes tem se apresentado como uma prática promissora para a maximização da eficiência fisiológica e produtiva das plantas. O silício, ainda que este elemento não seja essencial, confere benefícios à cultura da soja, sobretudo na mitigação de estresses. O silício promove o espessamento da parede celular mediante a deposição de sílica amorfa, aumentando a resiliência mecânica da planta, reduzindo a suscetibilidade a pragas e otimizando a eficiência no uso de água e nutrientes (KUMAWAT et al., 2019; CAMPOS et al., 2020; SHARMA et al., 2023). A aplicação foliar deste elemento destaca-se como uma estratégia eficaz frente às limitações anatômicas da soja para a sua absorção radicular, reforçando as defesas

estruturais e ativando mecanismos metabólicos associados à resiliência frente as condições de estresse (GUERRIERO; HAUSMAN; LEGAY, 2016; SOUZA JÚNIOR et al., 2022).

O silício, além de sua ação estrutural, contribui para a arquitetura radicular, corroborando com a FBN e as adaptações morfológicas, como a expansão das raízes sob estresse hídrico, o que amplia a capacidade de absorção de recursos essenciais pela soja (TRIPATHI et al., 2022; QUINTINO NETA et al., 2024). Essa integração entre os efeitos morfológicos e metabólicos do silício reforça sua importância no manejo da cultura, especialmente sob condições ambientais desfavoráveis.

De forma complementar, os fitohormônios desempenham funções centrais no desenvolvimento e na adaptação da soja. A auxina regula processos fundamentais, como divisão, diferenciação e alongamento celular, sendo determinante na formação de raízes laterais e na definição da arquitetura da planta (TAIZ et al., 2017; LI; CHEN, 2023). Por outro lado, a citocinina exerce efeito antagônico à auxina, reprimindo a formação de raízes laterais e promovendo a quebra da dominância apical, o que favorece a emissão de brotações laterais e, consequentemente, a ramificação (TAGLIAPIETRA et al., 2022; AZARAKHSH; LEBEDEVA, 2023). A interação coordenada entre auxinas, citocininas e giberelinas regula aspectos morfológicos e fisiológicos que impactam diretamente a eficiência no uso de nutrientes, a produtividade e a nodulação. A aplicação exógena de aminoácidos, potencializa os mecanismos fisiológicos de adaptação da soja, promovendo o equilíbrio osmótico, a regulação gênica e a ativação de sistemas antioxidantes (BATISTA-SILVA et al., 2019; MÓGOR; MÓGOR, 2025).

Dessa forma, o manejo integrado com distintas formulações de BPCV, associado ao uso de bioestimulantes como silício, hormônios e aminoácidos, é explorado nesse trabalho como uma estratégia sistêmica e sustentável para maximizar a produtividade e a resiliência da soja frente às crescentes demandas agrícolas e aos desafios impostos pelas variabilidades ambientais. A pesquisa foi estruturada em duas abordagens complementares, que buscam compreender de forma integrada como a coinoculação com BPCV, isoladamente ou em associação com bioestimulantes foliares, influencia aspectos relacionados ao crescimento, ao funcionamento fisiológico e ao desempenho da cultura, considerando parâmetros indicativos da eficiência metabólica e do desenvolvimento estrutural da planta.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA GERAL

A soja (*Glycine max* L.) ocupa posição estratégica entre as principais culturas agrícolas globais, com destaque para o Brasil, que lidera a produção mundial, sendo responsável por 59,3% das exportações agropecuárias nacionais em 2024 (SECRETARIA DE COMÉRCIO EXTERIOR, 2025). Esse protagonismo é sustentado não apenas pela sua relevância econômica, mas também por sua versatilidade no atendimento às demandas alimentares, nutricionais e energéticas, com projeções que indicam um aumento global de até 110% na demanda até 2050 (CARCIOCHI et al., 2019).

Entretanto, a intensificação da produção esbarra em desafios recorrentes, como a dependência de fertilizantes sintéticos, reflexo da acidez predominante dos solos brasileiros, e as oscilações sazonais decorrentes de condições climáticas adversas, que impactam diretamente a produtividade e a estabilidade dos sistemas agrícolas (TABOSA et al., 2024). Nesse contexto, estratégias sustentáveis que associem eficiência produtiva e redução de insumos químicos são cada vez mais necessárias.

Entre essas alternativas, destaca-se a aplicação de bioestimulantes, como silício, reguladores vegetais e aminoácidos, cujos efeitos complementam a suplementação nutricional, atuando de forma sistêmica na modulação de processos fisiológicos e estruturais da planta. O silício, embora não considerado essencial, exerce função determinante na resiliência da soja a estresses bióticos e abióticos, promovendo o espessamento da parede celular por meio da deposição de sílica amorfa, reduzindo a suscetibilidade aos estresses iminentes e aumentam a eficiência no uso de água e nutrientes (KUMAWAT et al., 2019; SHARMA et al., 2023). Além disso, a aplicação foliar de Si se sobressai como alternativa viável frente às limitações anatômicas da cultura na absorção radicular do elemento, refletindo em efeitos localizados nos tecidos tratados (GUERRIERO; HAUSMAN; LEGAY, 2016; HUSSAIN et al., 2021).

Corroborando, os reguladores vegetais contribuem para o ajuste morfofisiológico da soja. A auxina regula processos essenciais, como divisão, diferenciação e alongamento celular, sendo determinante na formação de raízes laterais e na definição da arquitetura da planta (TAIZ et al., 2017; LI; CHEN, 2023). Sua interação com citocininas, que modulam a dominância apical e a ramificação, e giberelinas, envolvidas na elongação caular e desenvolvimento reprodutivo, compõem um sistema regulatório altamente integrado, responsável pela plasticidade fenotípica e

pela capacidade adaptativa da cultura frente a diferentes condições ambientais (WANG et al., 2017; CUCINOTTA et al., 2020).

Em complemento, as BPCV aparecem como opção de manejo para a promoção de uma agricultura mais sustentável, produtivo e rentável. Essas atuam diretamente na promoção do crescimento via solubilização de nutrientes, como por exemplo, fósforo, ferro, zinco e entre outros, e via síntese de fitohormônios, além de efeitos indiretos associados à produção de compostos antimicrobianos que promovem a sanidade vegetal (OROZCO-MOSQUEDA et al., 2021). *B. megaterium* e *B. subtilis*, por exemplo, estimulam o crescimento e a produtividade da soja a níveis semelhantes aos que são obtidos com a aplicação completa de fertilizantes fosfatados (GUIMARÃES; KLEIN, 2023). Contribuindo nessa forma a solucionar a dependência nacional por fertilizantes químicos.

Em ambiente rizosféricas, as interações entre exsudatos radiculares e a microbiota resultam em relações altamente específicas, determinantes para a eficiência do comportamento simbiótico (SUGIYAMA, 2019). A rizosfera é um ambiente altamente ativo, influenciado pelos exsudatos radiculares que regulam a comunidade microbiana residente levando-a promoção das interações simbióticas (DESSAUX; GRANDCLÉMENT; FAURE, 2016). Algumas BPCV são capazes de formar biofilmes na rizoplane, resistir a condições adversas e garantir o estabelecimento estável das colônias (WANG et al., 2017; AJIJAH et al., 2023). Contudo, há mutantes de *A. brasilense*, por exemplo, desprovidos de receptores quimiotáticos, que acarretam na menor colonização no rizoplane e nos tecidos das zonas de diferenciação e alongação da raiz, sugerindo que diferenças nos mecanismos de reconhecimento impactam a interação planta-microrganismo (O'NEAL; VO; ALEXANDRE, 2020) e, conseqüentemente, a eficiência das formulações comerciais de inoculantes.

Esse conjunto de mecanismos, como quimiotaxia, formação de biofilme e reconhecimento específico da raiz, mostra-se importante para o sucesso do emprego de bactérias, como *Azospirillum brasilense* por exemplo. Desde sua descrição inicial por Tarrand, Krieg e Döbereiner (1978), essa espécie tem capacidade de fixar nitrogênio, mas também sintetiza fitohormônios que promovem o crescimento radicular da soja (CASSÁN et al., 2020). No entanto, sua eficácia como inoculante depende diretamente da eficiência desses processos iniciais de interação planta-microrganismo (O'NEAL; VO; ALEXANDRE, 2020).

A coinoculação de *Azospirillum* spp. com *Bradyrhizobium* spp. representa um avanço relevante nesse campo, integrando funções nutricionais e hormonais: enquanto o *Bradyrhizobium* contribui para a fixação de nitrogênio, reduzindo a necessidade de fertilizantes nitrogenados na cultura da soja, *Azospirillum* contribui para a promoção do crescimento radicular, para fornecimento de fitohormônios e para a mitigação de estresse, potencializando a eficiência fisiológica da planta (GUIMARÃES et al., 2018; MUNDIN et al., 2018; RONDINA et al., 2020). Tal associação sinérgica fortalece a comunicação entre raiz e parte aérea, refletindo-se em maior capacidade fotossintética e incrementos produtivos de até 16% (BARBOSA et al., 2021).

Adicionalmente, a atuação sinérgica entre *Pseudomonas fluorescens* e *Bradyrhizobium japonicum* também permite ganhos fisiológicos relacionados à nodulação, ao crescimento radicular e a absorção de nutrientes, reforçando a relevância do manejo integrado entre a inoculação de BPCVs e a adubação racional, alinhando-se aos princípios de uma agricultura mais eficiente e sustentável (GUIMARÃES; KLEIN, 2023b).

O sucesso dessas interações depende de múltiplos fatores, incluindo densidade do inóculo, capacidade de colonização da rizosfera, composição da microbiota residente e características edáficas, como pH, textura e disponibilidade de nutrientes do solo (XIA; RUFTY; SHI, 2020; LOPES; DIAS-FILHO; GURGEL, 2021). Além disso, aspectos ambientais e genéticos da planta que modulam a eficácia da inoculação, reforçando a necessidade de abordagens que considerem a complexidade sistêmica dessas interações (MOLEFE; AMOO; BABALOLA, 2023; CHEN; LIU, 2024).

Dentre as BPCV, *Bacillus* spp. se destacam pela multifuncionalidade, promovendo o crescimento vegetal por meio de três mecanismos principais: produção de antifúngicos e antibióticos, gerando antagonismo contra patógenos; secreção de compostos que estimulam o crescimento; e indução da resistência sistêmica, que amplia a defesa da planta frente a múltiplos agentes bióticos. A produção de fitohormônios, como auxinas, citocininas e giberelinas, reforça sua importância, ao regular processos fundamentais de alongamento celular, divisão e diferenciação, com impactos diretos no desenvolvimento radicular e aéreo da soja (SANSINENEA, 2019).

Assim, o manejo integrado com distintas formulações de BPCV, associado ao uso de bioestimulantes como silício, hormônios e aminoácidos, configura-se como uma estratégia sistêmica e sustentável, que não apenas maximiza a produtividade da soja, mas também reforça

sua resiliência frente às crescentes demandas agrícolas e aos desafios impostos pelas variabilidades ambientais. A convergência dessas práticas oferece fundamentos sólidos para se compreender como diferentes combinações de inoculantes e bioestimulantes podem interferir de maneira diferenciada na biometria e fisiologia da soja, e como essas interações promovem efeitos sinérgicos capazes de elevar a eficiência metabólica e o desempenho produtivo da cultura.

3. REFERÊNCIAS

- AJIJAH, N. et al. Plant Growth-Promoting Bacteria (PGPB) with Biofilm-Forming Ability: A Multifaceted Agent for Sustainable Agriculture. **Diversity**, v. 15, n. 1, 1 jan. 2023.
- AZARAKHSH, M.; LEBEDEVA, M. A. Lateral Root versus Nodule: The Auxin-Cytokinin Interplay. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 42, n. 11, p. 6903–6919, 1 nov. 2023.
- BARBOSA, J. Z. et al. Meta-analysis reveals benefits of co-inoculation of soybean with *Azospirillum brasilense* and *Bradyrhizobium* spp. in Brazil. **Applied Soil Ecology**, v. 163, n. February, 2021.
- BATISTA-SILVA, W. et al. The role of amino acid metabolism during abiotic stress release. **Plant, Cell & Environment**, Hoboken, v. 42, n. 5, p. 1630–1644, 2019.
- BRASIL. *Política nacional de fertilizantes: diagnóstico, estratégias e governança*. 1. ed. Brasília: Secretaria de Assuntos Estratégicos da Presidência da República, 2022. Disponível em: https://www.gov.br/planalto/pt-br/assuntos/assuntos-estrategicos/documentos/estudos-estrategicos/sae_publicacao_fertilizantes_v10.pdf. Acesso em: 22 set. 2024.
- CAMPOS, C. N. S. et al. Silicon mitigates ammonium toxicity in plants. **Agronomy Journal**, v. 112, n. 2, p. 635–647, 1 mar. 2020.
- CARCIOCHI, W. D. et al. Soybean yield, biological N₂ fixation and seed composition responses to additional inoculation in the United States. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, 1 dez. 2019.
- CASSÁN, F. et al. Everything you must know about *Azospirillum* and its impact on agriculture and beyond. **Biology and Fertility of Soils**, v. 56, n. 4, p. 461–479, 1 maio 2020.
- CHEN, L.; LIU, Y. The Function of Root Exudates in the Root Colonization by Beneficial Soil Rhizobacteria. **Biology**, v. 13, n. 2, p. 1–18, 1 fev. 2024.
- CUCINOTTA, M. et al. Gynoecium size and ovule number are interconnected traits that impact seed yield. **Journal of Experimental Botany**, v. 71, p. 2479–2489, 2020.
- DESSAUX, Y.; GRANDCLÉMENT, C.; FAURE, D. Engineering the Rhizosphere. **Trends in Plant Science**, v. 21, n. 3, p. 266–278, 1 mar. 2016.

FAOSTAT. FAOSTAT.

Disponível

em:

https://www.fao.org/faostat/en/#rankings/countries_by_commodity. Acesso em: 03 mar. 2025.

GUERRIERO, G.; HAUSMAN, J. F.; LEGAY, S. **Silicon and the plant extracellular matrix**. *Frontiers in Plant Science* Frontiers Media S.A., , 12 abr. 2016.

GUIMARÃES, V. F. et al. Bactérias Promotoras de Crescimento. **CIÊNCIAS AGRÁRIAS: ética do cuidado, legislação e tecnologia na agropecuária**, n. March, p. 212, 2018.

GUIMARÃES, V. F.; KLEIN, J. Eficiência agronômica dos inoculantes líquido e turfoso, formulados a base de *Pseudomonas fluorescens*, para a cultura da soja via tratamento de sementes, associado à adubação fosfatada. **OBSERVATÓRIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA**, v. 21, n. 9, p. 11162–11203, 11 set. 2023b.

GUIMARÃES, V. F.; KLEIN, J. Inoculante líquido contendo *B. megaterium* e *B. subtilis* é eficiente em promover crescimento e disponibilizar fósforo para a soja. **DELOS: DESARROLLO LOCAL SOSTENIBLE**, v. 16, n. 46, p. 2029–2060, 4 set. 2023a.

HUNGRIA, M; NOGUEIRA, M. A. Tecnologia de inoculação na cultura da soja: mitos, verdades e desafios. In: FUNDAÇÃO MT. **Boletim de pesquisa**: 2019/2020. Rondonópolis: Fundação Mt, 2019. p. 51-62.

HUSSAIN, S. et al. Foliar application of silicon improves growth of soybean by enhancing carbon metabolism under shading conditions. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 159, p. 43–52, 1 fev. 2021

IBGE. **Produção Agrícola Municipal: Culturas Temporárias e Permanentes**. 2023. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9117-producao-agricola-municipal-culturas-temporarias-e-permanentes.html?utm_source=landing&utm_medium=explica&utm_campaign=producao_agropecuaria. Acesso em: 05 mar. 2025.

KUMAWAT, N. et al. Silicon (Si)- and zinc (Zn)-solubilizing microorganisms: Role in sustainable agriculture. In: GIRI, B.; PRASAD, R.; WU, Q. S.; VARMA, A. (org.). **Biofertilizers for sustainable agriculture and environment**. Cham: Springer, 2019. p. 109-135.

LI, L.; CHEN, X. Auxin regulation on crop: from mechanisms to opportunities in soybean breeding. **Molecular Breeding**, v. 43, n. 3, 1 mar. 2023.

LOPES, M. J. DOS S. et al. Successful Plant Growth-Promoting Microbes: Inoculation Methods and Abiotic Factors. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 5, 25 fev. 2021.

MÓGOR, Átila Francisco; MÓGOR, Gilda. Aminoácidos na adaptação das plantas aos estresses abióticos. In: **ABISOLO – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE TECNOLOGIA EM NUTRIÇÃO VEGETAL** (org.). Anuário Brasileiro de Tecnologia em Nutrição Vegetal. 2025. p. 68–71.

MOLEFE, R. R.; AMOO, A. E.; BABALOLA, O. O. Communication between plant roots and the soil microbiome; involvement in plant growth and development. **Symbiosis**, v. 90, p. 231–239, 2023.

MORAIS, Heverly *et al.* **Boletim indica que 2024 foi um ano predominantemente seco com chuvas mal distribuídas.** 2025. Disponível em: <https://www.idrparana.pr.gov.br/Noticia/Boletim-indica-que-2024-foi-um-ano-predominantemente-seco-com-chuvas-mal-distribuidas>. Acesso em: 06 mar. 2025.

MUNDIN, L. M. F. et al. COINOCULAÇÃO DE *Azospirillum brasilense* E *Bradyrhizobium* VIA SEMENTES de SOJA NO CERRADO. **Global Science and technology**, 2018.

O’NEAL, L.; VO, L.; ALEXANDRE, G. Specific root exudate compounds sensed by dedicated chemoreceptors shape *Azospirillum brasilense* chemotaxis in the rhizosphere. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 86, n. 15, 1 ago. 2020.

OROZCO-MOSQUEDA, M. DEL C. et al. Plant growth-promoting bacteria as bioinoculants: Attributes and challenges for sustainable crop improvement. **agronomy** MDPI AG, , 1 jun. 2021.

OUR WORLD IN DATA. **Soybean production.** 2023. Disponível em: https://ourworldindata.org/grapher/soybean-production?tab=discrete-bar&time=latest&country=USA~BRA~CHN~ARG~CAN~FRA~Americas+%28FAO%29~OWID_WRL. Acesso em: 03 mar. 2025.

QUINTINO NETA, F. X. et al. Dinâmica do silício no sistema solo planta e sua participação no metabolismo e nutrição de plantas: uma revisão. **OBSERVATÓRIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA**, v. 22, n. 9, p. e6671, 13 set. 2024.

RAMAKRISHNA, W.; YADAV, R.; LI, K. Plant growth promoting bacteria in agriculture: Two sides of a coin. **Applied Soil Ecology**, v. 138, p. 10–18, 1 jun. 2019.

RONDINA, A. B. L. et al. Changes in root morphological traits in soybean co-inoculated with *Bradyrhizobium* spp. and *Azospirillum brasilense* or treated with *A. brasilense* exudates. **Biology and Fertility of Soils**, v. 56, n. 4, p. 537–549, 1 maio 2020.

SANSINENEA, Estibaliz. *Bacillus* spp.: As Plant Growth-Promoting Bacteria. In: SINGH, Harikesh Bahadur *et al.* **Secondary Metabolites of Plant Growth Promoting Rhizomicroorganisms**. S.I: Springer Singapore, 2019. p. 1-410.

Secretaria do Comércio Exterior. **Comex Vis.** Disponível em: <https://comexstat.mdic.gov.br/pt/comex-vis>. Acesso em: 03 mar. 2025.

SHARMA, B. et al. Silicon and plant nutrition—dynamics, mechanisms of transport and role of silicon solubilizer microbiomes in sustainable agriculture: A review. **Pedosphere**, v. 33, n. 4, p. 534–555, 1 ago. 2023.

SOUZA JÚNIOR, J. P de. et al. Foliar Application of Innovative Sources of Silicon in Soybean, Cotton, and Maize. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 22, n. 3, p. 3200–3211, 1 set. 2022.

SUGIYAMA, A. The soybean rhizosphere: Metabolites, microbes, and beyond—A review. **Journal of Advanced Research**, v. 19, p. 67–73, set. 2019.

TABOSA, F. J. S. et al. Fertilizer price behavior in Brazil - 2018 to 2021. **CONTRIBUCIONES A LAS CIENCIAS SOCIALES**, v. 17, n. 2, p. e5154, 15 fev. 2024.

TAGLIAPIETRA, E. L. et al. **Ecofisiologia da Soja Visando Altas**. 2. ed. Santa Maria-RS: Field Crops, 2022.

TAIZ, L. et al. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal Diversidade vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 2017. v. 6 ed.

TARRANT, J. J.; KRIEG, N. R.; DOBEREINE, J. A taxonomic study of the *Spirillum lipoferum* group, with descriptions of a new genus, *Azospirillum* gen. nov. and two species, *Azospirillum lipoferum* (Beijerinck) comb. nov. and *Azospirillum brasilense* sp. nov. **CAN. J. MICROBIOL.**, v. 24, p. 967–980, 1978.

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, 1 jan. 2021.

WANG Y. et al. Gibberellin in plant height control: old player, new story. **Plant Cell Reports**, v. 36, p. 391–398, 2017.

WANG, D. et al. Biofilm formation enables free-living nitrogen-fixing rhizobacteria to fix nitrogen under aerobic conditions. **ISME Journal**, v. 11, n. 7, p. 1602–1613, 1 jul. 2017.

XIA, Q.; RUFTY, T.; SHI, W. Soil microbial diversity and composition: Links to soil texture and associated properties. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 149, 1 out. 2020.

4. CAPÍTULO 1: CARACTERÍSTICAS BIOMÉTRICAS E TROCAS GASOSAS DE SOJA COINOCULADAS COM BACTÉRIAS PROMOTORAS DE CRESCIMENTO VEGETAL

Resumo: A soja (*Glycine max* [L.] Merrill) destaca-se como cultura de importância estratégica para a agricultura brasileira, sendo relevante na produção de óleo vegetal e proteína. Diante da crescente demanda global prevista até 2050, estratégias sustentáveis tornam-se essenciais para enfrentar desafios como variabilidade climática e dependência de fertilizantes sintéticos. A coinoculação com bactérias promotoras de crescimento vegetal (BPCV) é uma alternativa promissora, por estimular o desenvolvimento morfofisiológico e melhorar a eficiência metabólica da cultura. Este estudo teve como objetivo avaliar os efeitos da coinoculação de *Bradyrhizobium japonicum* com diferentes BPCV sobre características biométricas e trocas gasosas da soja, sob condições de campo. O experimento foi conduzido com a cultivar 64I61RSF IPRO, em delineamento em blocos casualizados, com oito tratamentos envolvendo T1 (controle) – sementes inoculadas com *Bradyrhizobium japonicum* (SEMIA 5079); T2 – *B. japonicum* (SEMIA 5079) + *Azospirillum brasilense* (Abv5/Abv6); T3 – *B. japonicum* (SEMIA 5079) + *Pseudomonas fluorescens* (ATCC 13525); T4 – *B. japonicum* (SEMIA 5079) + *Bacillus aryabhattai* (CBMAI 1120), *B. circulans* (CCT 7926) e *B. haynesii* (CCT 0026); T5 – *B. japonicum* (SEMIA 5079) + *B. amyloliquefaciens* (CNPSO 3202), *B. velezensis* (CNPSO 3602) e *B. thuringiensis* (CNPSO 3915); T6 – *B. japonicum* (SEMIA 5079) + *B. subtilis* (CNPMS B2084) e *B. megaterium* (CNPMS B119); T7 – *B. japonicum* (SEMIA 5079) + *B. aryabhattai* (CMAA 1363); T8 – *B. japonicum* (SEMIA 5079) + *A. brasilense* (Abv5/Abv6) + *P. fluorescens* (ATCC 13525). Foram avaliadas variáveis como altura de planta, diâmetro do caule, massa seca de folhas, caule e raiz, área foliar, número de nódulos, índice SPAD e parâmetros de trocas gasosas (assimilação de CO₂, condutância estomática, transpiração, concentração interna de CO₂, razão *Ca/Ci*, eficiência do uso da água e carboxilação). Os resultados demonstraram que a coinoculação influenciou significativamente atributos vegetativos e fisiológicos da soja. A combinação com *A. brasilense* proporcionou maior razão raiz/parte aérea, indicando alocação preferencial de biomassa ao sistema radicular. Os tratamentos com *Bacillus* destacaram-se pelo aumento da condutância estomática, da concentração interna de CO₂ e da eficiência do uso da água. As análises de correlação revelaram relações consistentes entre variáveis estruturais e fisiológicas, indicando que a coinoculação modula o funcionamento fotossintético e a distribuição de biomassa. A relação negativa entre eficiência do uso da água e variáveis como altura, concentração interna de CO₂ e área foliar, indicou que maior crescimento vegetativo nem sempre está associado a maior eficiência fisiológica. Os resultados evidenciam que a coinoculação com BPCV promove ajustes funcionais e estruturais que favorecem o desempenho fisiológico da soja, com destaque para a atuação de *A. brasilense* e estirpes de *Bacillus*. A integração desses microrganismos no manejo da cultura representa uma estratégia biologicamente eficiente e potencialmente aplicável a sistemas agrícolas sustentáveis.

Palavras-Chaves: *Glycine max*, Rizobactérias; PGPR; morfofisiologia

4.1. INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max* L.) é reconhecida mundialmente por seu elevado valor nutricional, sendo fonte essencial de proteínas, óleos, carboidratos, isoflavonas e minerais, componentes amplamente utilizados na formulação de dietas humanas e animais (CARCIOCHI et al., 2019). Esse protagonismo alimentar e industrial é refletido nas projeções de consumo, que indicam um aumento interno de 19,1% até a safra 2033/2034, alcançando 69,8 milhões de toneladas (MAPA, 2024). No Brasil, a soja não se limita à exportação, sendo também insumo fundamental na produção de alimentos da cesta básica, além de fornecer ingredientes para a indústria de ultraprocessados, como margarinas, massas, bebidas e entre outros (CAMPOS, 2023).

Frente a essa crescente demanda, práticas agrícolas sustentáveis tornam-se indispensáveis, especialmente no que diz respeito ao manejo de nitrogênio. A soja requer cerca de 80 kg de nitrogênio por tonelada de grãos produzidos, sendo que aproximadamente 94% dessa necessidade é suprida pela fixação biológica de nitrogênio (FBN) via inoculação com *Bradyrhizobium japonicum* (HUNGRIA; NOGUEIRA, 2019). Esse processo, catalisado pela enzima nitrogenase, dependente de ferro e molibdênio, converte o nitrogênio atmosférico (N₂) em amônia (NH₃), tornando-o assimilável pela planta (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006). Assim, a FBN configura-se como uma ferramenta para reduzir a dependência de fertilizantes sintéticos e promover maior sustentabilidade à cultura.

Os patamares alcançados de produtividade da soja devem-se, em grande parte, à aplicação de tecnologias como a FBN com estirpes e cultivares compatíveis, assim reduzindo a necessidade de fertilização nitrogenada (NOGUEIRA et al., 2018). O uso de soluções biotecnológicas, como a coinoculação com BPCV, apresenta-se como estratégia para potencializar o desempenho da soja e minimizar a dependência de insumos químicos. Essas bactérias desempenham múltiplas funções benéficas às plantas, entre as quais destacam-se a solubilização de nutrientes, a produção de fitohormônios e a indução de mecanismos de resistência frente a patógenos (OROZCO-MOSQUEDA et al., 2021; LI et al., 2023). A rizosfera, caracterizada pela riqueza de exsudatos radiculares, configura-se como um ambiente propício para essas interações, que favorecem o desenvolvimento vegetal mediante processos bioquímicos e ecológicos complexos (SUGIYAMA, 2019).

O uso de microrganismos com potencial de promover o crescimento vegetal, como as rizobactérias do gênero *Pseudomonas*, tem ganhado destaque na cultura da soja, especialmente pela sua capacidade de solubilizar fosfatos e favorecer a absorção de nutrientes essenciais (VEY et al., 2025). Tais características são relevantes em sistemas agrícolas que buscam reduzir a dependência de fertilizantes minerais, promovendo maior sustentabilidade na produção. Além disso, *Pseudomonas fluorescens* vêm sendo avaliadas em conjunto com a adubação fosfatada, com resultados promissores na promoção de crescimento e produtividade da soja (GUIMARÃES; KLEIN, 2023b), de mesma maneira, *Bacillus megaterium* e *Bacillus subtilis* vem mostrando potencial de promover o crescimento e a produtividade da soja de forma comparável à adubação fosfatada tradicional (GUIMARÃES; KLEIN, 2023a)

Entre as funções das BPCV, contribuem para aclimações a estresses abióticos por meio da síntese de fitohormônios e de moléculas sinalizadoras. Além disso, sua atuação pode contribuir para a proteção vegetal, seja pela indução de resistência sistêmica, seja pelo antagonismo direto a fitopatógenos (CHATTARAJ et al., 2025). A eficiência dessas interações está diretamente associada à capacidade de colonização da rizosfera, processo que envolve etapas como quimiotaxia, adesão às raízes, formação de biofilmes e, eventualmente, colonização endofítica (LIU et al., 2024), podendo variar conforme as características das formulações comerciais de inoculantes.

A própria planta exerce papel ativo na modulação dessas comunidades microbianas, ao liberar exsudatos que afetam a colonização bacteriana na rizosfera (ZHALNINA et al., 2018; DU et al., 2021). Além disso, a sinalização química entre microrganismos, por meio de quimiotaxia secundária, favorece a concentração e o estabelecimento dessas bactérias em regiões específicas do sistema radicular (CREMER et al., 2019; INSALL et al., 2022).

O cenário econômico também evidencia a relevância dessas tecnologias, com o mercado global de inoculantes movimentando aproximadamente US\$ 486,48 bilhões em 2023 e projeção de expansão significativa até 2033. No Brasil, a soja responde por 77% do consumo nacional desses insumos, com predomínio de produtos à base de *Bradyrhizobium* spp. (57%), seguidos de formulações contendo *Azospirillum* e *Pseudomonas* spp. (38%) (SPHERICAL INSIGHTS, 2024; ANPIIBIO, 2024). Apesar do potencial dessas tecnologias, persistem entraves relacionados ao custo dos inoculantes e à limitação no acesso a informações técnicas, aspectos que ainda restringem a adoção por pequenos produtores (SPHERICAL INSIGHTS, 2024; MARKET DATA FORECAST, 2024).

Diante desse panorama, torna-se necessária a realização de estudos que avaliem o desempenho agrônomo de distintas formulações microbianas, visando identificar combinações mais eficazes para o manejo da soja. Neste sentido, a presente pesquisa foi orientada pela hipótese de que diferentes formulações de bactérias promotoras de crescimento vegetal interferem de forma distinta na biometria e na fisiologia da soja, contribuindo para o avanço do conhecimento sobre a eficiência dessas tecnologias. Assim, o objetivo deste estudo consistiu em avaliar o efeito e a capacidade de promoção de crescimento de formulações comerciais de inoculantes contendo BPCV, em coinoculação sobre parâmetros biométricos e trocas gasosas da soja.

4.2. MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado entre outubro de 2023 a fevereiro de 2024, conduzido à campo na estação experimental prof. Dr. Antônio Carlos do Santos Pessoa, localizada nas coordenadas 24°31'55.40"S e 54°1'4.93"O, no município de Marechal Cândido Rondon, estado do Paraná, Brasil, pertencente à universidade estadual do oeste do paraná (UNIOESTE). Na qual, possui classificação climática cfa, com temperatura média anual de 21,1 c e precipita   média anual de 1.726 mm, conforme dados de k ppen brasil (2024). Os dados meteorológicos durante o período de estudo estão apresentados na figura 1.

Sementes de soja da variedade 64I61RSF IPRO, usada no experimento, pertencente ao grupo de maturaa o 6,4, com tipo de crescimento indeterminado e porte médio. Com resistência ao cancro da haste,   mancha olho-de-r ,   pústula bacteriana e   podridão radicular causada por *Phytophthora*. Possui o peso médio de mil sementes de 156 gramas, foram tratadas com piraclostrobina (25 g/L), tiofanato tet lico (225 g/L) e fipronil (250 g/L), além de cobalto e molibdênio.

O experimento foi conduzido em delineamento em blocos casualizados com oito tratamentos e quatro repetições. As sementes foram coinoculadas com BPCV provenientes de inoculantes comerciais, constituindo os seguintes tratamentos: T1 (controle) – sementes inoculadas com *Bradyrhizobium japonicum* (SEMIA 5079); T2 – *B. japonicum* (SEMIA 5079) + *Azospirillum brasilense* (Abv5/Abv6); T3 – *B. japonicum* (SEMIA 5079) + *Pseudomonas fluorescens* (ATCC 13525); T4 – *B. japonicum* (SEMIA 5079) + *Bacillus aryabhattai* (CBMAI

1120), *B. circulans* (CCT 7926) e *B. haynesii* (CCT 0026); T5 – *B. japonicum* (SEMIA 5079) + *B. amyloliquefaciens* (CNPSO 3202), *B. velezensis* (CNPSO 3602) e *B. thuringiensis* (CNPSO 3915); T6 – *B. japonicum* (SEMIA 5079) + *B. subtilis* (CNPMS B2084) e *B. megaterium* (CNPMS B119); T7 – *B. japonicum* (SEMIA 5079) + *B. aryabhattai* (CMAA 1363); T8 – *B. japonicum* (SEMIA 5079) + *A. brasilense* (Abv5/Abv6) + *P. fluorescens* (ATCC 13525).

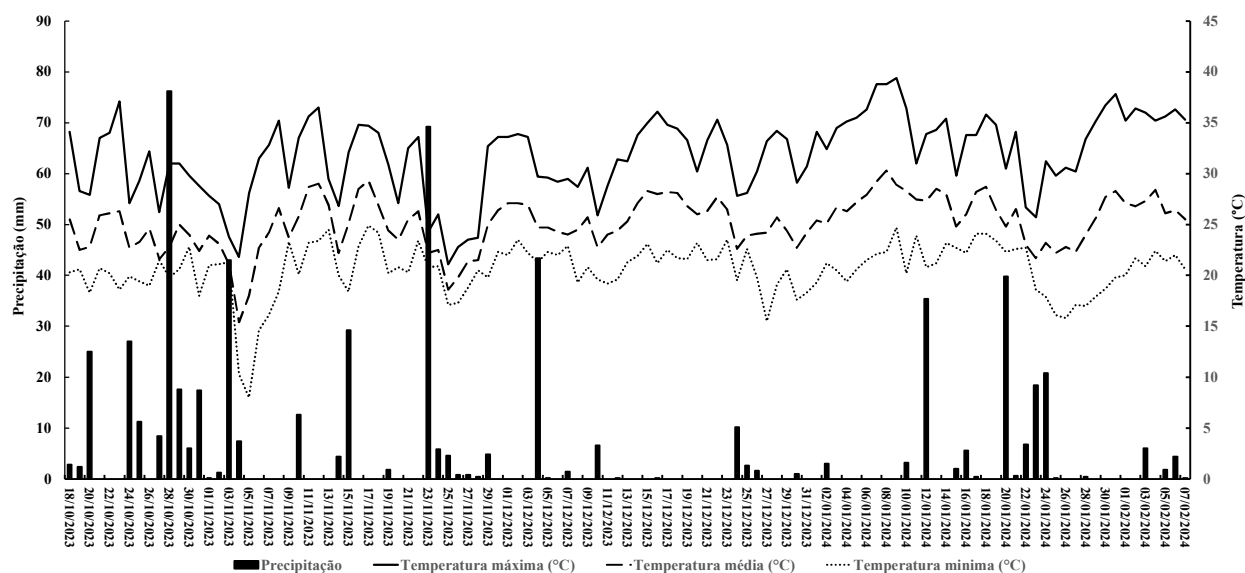


Figura 1. Precipitação e temperatura máxima, média e mínima durante o período experimental da soja cultivada a campo, em Marechal Cândido Rondon – PR, entre outubro de 2023 e fevereiro de 2024. Fonte: Inmet (2024).

A semeadura foi realizada na densidade de 280.000 plantas ha⁻¹, em espaçamento de 0,50 m entre linhas, com sete linhas por parcela, com comprimento de 5,0 m, com área por parcela de 20,25 m² totalizando uma área experimental de 648 m², sendo a área útil da parcela, na qual foi descontada 1m de cada lado, de 6,15 m². A operação foi executada com o auxílio de uma semeadora manual de uma linha, tracionada por operador, equipada com disco dosador acionado por corrente. A adubação foi feita com aplicação na base de 290 kg ha⁻¹ do fertilizante 02-20-18. O solo da área experimental é classificado como latossolo vermelho eutroférico, e as características químicas do solo coletado na camada de 0-20 cm estão apresentadas na tabela 1.

Durante a condução do experimento os tratos culturais foram realizados por meio de capinas regulares e aplicações de produtos fitossanitários realizadas com pulverizador costal elétrico à bateria (modelo GPE2000 – Intech Machine) de 20L. Foram realizadas duas aplicações

de glifosato na dose de 1 kg ha⁻¹. Em três aplicações, para inseticida usou-se duas formulações, uma contendo bifentrina (100 g L⁻¹) + imidacloprido (100 g L⁻¹), aplicado na dose de 900 mL ha⁻¹, e a outra contendo bifentrina (50 g L⁻¹), na dose de 400 mL ha⁻¹. Também foram realizadas três aplicações com duas formulações de fungicidas, uma contendo trifloxistrobina (100 g L⁻¹) + protriocanazol (100 g L⁻¹), aplicada na dose de 1,0 L ha⁻¹; e a outra mais concentrada dos mesmos ingredientes ativos (200 g L⁻¹ e 233 g L⁻¹, respectivamente), aplicadas na dose de 0,375 L ha⁻¹.

Tabela 1. Caracterização físico-química do solo na camada de 0–20 cm da área de instalação do experimento com soja, conduzido em Latossolo Vermelho eutrófico, em Marechal Cândido Rondon – PR, 2023/24

pH	V	P	MO	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Al ³⁺	H+Al	SB	CTC
CaCl ₂	-%	mg dm ⁻³	g dm ⁻³	----- cmol _c dm ⁻³ -----						
4,93	58	50,18	35,18	3,90	2,35	0,53	0,21	4,93	6,78	11,71
Fe		Mn			Cu			Zn		
----- mg dm ⁻³ -----										
30,49		132,22			5,98			3,73		

(P, K, Micronutrientes) Extrator Mehlich-1; (Al, Ca, Mg) Extrator KCl 1 mol L⁻¹; (H+Al) pH SMP (7,5); Matéria orgânica: método Walkley e Black. Análise realizada no laboratório de química agrícola da universidade estadual do oeste do paraná em Marechal Candido Rondon, PR. Fonte: Autores.

As avaliações fisiológicas compreenderam a mensuração das trocas gasosas pontuais, no estágio R1, sendo aferidas com o medidor portátil LI-6400XT (IRGA), entre 9h e 11h da manhã, sob condição de céu completamente limpo, ausência de nuvens e luminosidade plena. O equipamento foi configurado com intensidade de feixe de luz de 1000 µmol m⁻² s⁻¹ de radiação fotossinteticamente ativa (PAR). Foram mensuradas as seguintes variáveis: *A* - taxa de assimilação líquida de CO₂ (µmol m⁻² s⁻¹), *E* - taxa de transpiração (mmol m⁻² s⁻¹), *gs* - condutância estomática (mol m⁻² s⁻¹), *Ci* - concentração interna de CO₂ (µmol mol⁻¹) e *Ca/Ci* - razão entre concentração externa e interna de CO₂ (µmol mol⁻¹). A *EUA* - eficiência do uso da água foi calculada por *A/E*, a *iEUA* - eficiência intrínseca do uso da água por *A/gs* e a *fC* - eficiência instantânea de carboxilação por *A/Ci*. As medições foram realizadas em folhas aleatórias do terço superior das plantas, expostas à luz solar direta e isentas de sintomas visuais de pragas, doenças ou deficiências nutricionais.

Mensurou-se também o índice SPAD (teor relativo de clorofila), com auxílio do equipamento 502-Plus Konica Minolta, foi realizada nos estádios R3 e R5, usando a média de quatro folhas aleatórias do terço superior das plantas, expostas à luz solar e livres de sintomas visuais de pragas, doenças ou deficiências nutricionais dentro da área útil de cada parcela.

As avaliações biométricas foram realizadas no estádio R2, correspondente ao florescimento pleno, com a seleção aleatória de três plantas dentro da área útil de cada parcela. Foram mensuradas a altura das plantas com régua graduada de 30 cm (escala 1:100) e o diâmetro basal do coleto com paquímetro digital. As folhas dessas plantas foram utilizadas para determinação da área foliar com auxílio do medidor LI-3100C (Area Meter). Também realizou a contagem do número de nódulos nas raízes, após lavagem em água corrente para remoção do solo. As raízes e a parte aérea foram seccionadas, acondicionadas em sacos de papel Kraft e secas em estufa de circulação forçada de ar a 65 °C por 72 horas. Sendo então obtida a massa seca das folhas (MSF), das raízes (MSR) e do caule com pecíolo (MSC+P) com auxílio de balança de precisão (modelo FA2104N – Celtac), com capacidade de 210 g e resolução de 0,0001 g. A massa seca da parte aérea (MSPA) foi obtida pela soma de MSF e MSC+P, e a massa seca total (MST) pela soma de MSPA com MSR. A razão raiz/parte aérea foi calculada pela divisão da MSR pela MSPA.

Os dados referentes às variáveis fisiológicas e biométricas foram submetidos à análise de variância (ANOVA), após verificação da normalidade dos resíduos pelo teste de Shapiro-Wilk e da homogeneidade das variâncias. As médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, utilizando o software SISVAR versão 5.8, build 92 (FERREIRA 2000). Para avaliar a associação entre as variáveis fisiológicas e biométricas, foi empregada a correlação de Pearson. O coeficiente de correlação (r) varia de -1 a 1, onde valores negativos indicam correlação inversa e valores positivos demonstram correlação direta entre as variáveis analisadas. A intensidade da correlação foi classificada de acordo com os intervalos descritos por Aldrich (1995), Haig (2007) e Kozak (2009), considerando correlações muito fortes para valores entre 0,9 e 1, fortes entre 0,7 e 0,9, moderadas entre 0,5 e 0,7, fracas entre 0,3 e 0,5, e ausência de relação linear para valores abaixo de 0,3. A significância das correlações foi determinada por meio do teste t , utilizando o software Genes (CRUZ, 1997).

4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para as variáveis biométricas (Tabela 2), o controle (T1), T2 e T4 apresentaram diferenças significativas a 5% para teste de Tukey. Destaca-se a altura das plantas, onde para o T4 foram superiores e T2 a mais baixa. Quanto à razão raiz-parte aérea, para o T2 obteve-se maior valor enquanto o controle apresentou a menor relação. Para as demais variáveis não foram verificadas diferenças significativas pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

A provável síntese de fitohormônios por *A. brasilense* como: auxinas, citocininas, giberelinas, entre outros, evidenciou na promoção do crescimento radicular em T2, apresentando a menor altura em relação aos demais tratamentos, e a maior razão raiz/parte aérea, com 62,77% a mais em relação ao controle, sugerindo que há um direcionamento dos recursos obtidos para o desenvolvimento de um sistema radicular robusto favorecendo-o na captação dos recursos essenciais para a manutenção da soja, porém, com impacto menor na altura da planta. Em estudo de Bulegon et al., (2019) não foi encontrado diferença para altura da soja coinoculada com *A. brasilense* antes de submeter à restrição hídrica. Prando et al. (2020) e Mesquita e Silva (2023) contudo, destacam o desenvolvimento radicular com aumento tanto dos atributos de comprimento, densidade e ramificações das raízes quanto do volume e da extensão da zona de absorção. Observa-se por consequência maior área de exploração na absorção de água e nutrientes, como consequência principal dessa coinoculação (RONDINA et al., 2020). Essa mesma tendência observa-se no contexto desse trabalho, principalmente quando se considera demonstrado em T2, ação este favorecido em função da ocorrência de déficit hídrico evidenciado como mostrado na figura 1, principalmente coincidindo sobre estádios R2 ao R6. A principal auxina sintetizada por *A. brasilense* nas quatro vias dependentes de triptofano, o ácido indol-3-acético (AIA) (RIVERA et al., 2018) está correlacionado à resposta observada em T2. A concentração desse hormônio regula a emissão de raízes laterais (TAIZ et al., 2017).

Por outro lado, T4 apresentou em torno de 19,54% a mais em altura das plantas em comparação ao T2, mas semelhante aos demais tratamentos. Marchão et al. (2024) relatam que a coinoculação com *B. aryabhattai*, *B. haynesii* e *B. circulans* proporcionou ganho de 2,75% na altura da soja em comparação com o tratamento sem inoculação. Contudo, no contexto desse trabalho o controle, apenas inoculado com *B. japonicum*, não resultou em diferença significativa na altura em relação ao T4. Esse resultado indica que a presença do *Bacillus*, mesmo mediante de benefícios como síntese fitohormonal, solubilização de P (SAEID et al., 2018), dentre outros, que promovem o crescimento da planta, não influenciou de forma significativa na altura das plantas.

Além disso, em condições de estresse abiótico, a coinoculação com *A. brasilense*, como observado em estudos com forrageiras, o fechamento estomático é antecipado em um dia em comparação ao tratamento com a ausência bacteriana (BULEGON et al., 2017). Isso sugere que T2, com sua maior robustez radicular e menor altura, esteja aclimatando melhor as condições estressantes estabelecidas. Quando se leva em consideração o T4, em virtude do equilíbrio apresentado entre a altura de planta e sistema radicular robusto, tende a ser resiliente às tais condições estressantes, mas inferior em comparação a T2.

Tabela 2. Variáveis biométricas de plantas da cultivar de soja 64I61RSF IPRO submetidas à coinoculação com bactérias promotoras de crescimento vegetal: Área foliar (AF), altura (ALT), diâmetro do caule (D), número de nódulos (NN), massa seca foliar (MSF), massa seca do caule + pecíolo (MSC+P), massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca radicular (MSR), massa seca total (MST) e razão raiz parte aérea (R/PA), Marechal Cândido Rondon, PR, 2023/2024

Tratamentos	AF (cm ²)	ALT (cm)	D (mm)	NN	MSF (g)	MSC+P (g)	MSPA (g)	MSR	MST (g)	R/PA (g/g)
T1	2898,21	67,97ab	9,17	13,49	11,72	16,67	28,39	2,26	30,64	0,137b
T2	2694,46	58,70b	9,19	13,42	13,29	15,67	29,26	3,26	32,51	0,223a
T3	2917,94	61,88ab	8,93	13,00	12,01	19,01	31,01	3,09	34,10	0,165ab
T4	2871,91	70,17a	8,84	16,67	10,01	16,76	26,76	2,84	29,60	0,173ab
T5	2753,88	67,70ab	7,35	11,58	10,76	13,01	23,76	2,34	26,10	0,180ab
T6	3264,70	68,81ab	8,47	16,50	13,83	18,51	32,26	3,26	35,51	0,175ab
T7	2918,15	67,82ab	8,57	9,59	11,93	16,84	28,76	2,68	31,43	0,158ab
T8	3014,26	67,75ab	8,43	12,25	12,59	17,51	30,09	3,34	33,42	0,188ab
Cv (%)	23,64	7,44	13,68	36,14	25,43	23,00	21,31	25,93	21,26	17,55

Letras minúsculas iguais, em cada coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.: T1 (controle) – sementes inoculadas com *Bradyrhizobium japonicum* (SEMIA 5079); T2 – *B. japonicum* (SEMIA 5079) + *Azospirillum brasilense* (Abv5/Abv6); T3 – *B. japonicum* (SEMIA 5079) + *Pseudomonas fluorescens* (ATCC 13525); T4 – *B. japonicum* (SEMIA 5079) + *Bacillus aryabhattai* (CBMAI 1120), *B. circulans* (CCT 7926) e *B. haynesii* (CCT 0026); T5 – *B. japonicum* (SEMIA 5079) + *B. amyloliquefaciens* (CNPSO 3202), *B. velezensis* (CNPSO 3602) e *B. thuringiensis* (CNPSO 3915); T6 – *B. japonicum* (SEMIA 5079) + *B. subtilis* (CNPMS B2084) e *B. megaterium* (CNPMS B119); T7 – *B. japonicum* (SEMIA 5079) + *B. aryabhattai* (CMAA 1363); T8 – *B. japonicum* (SEMIA 5079) + *A. brasilense* (Abv5/Abv6) + *P. fluorescens* (ATCC 13525).

Para as variáveis de trocas gasosas, apresentadas na tabela 3, foram observadas diferenças significativas entre a concentração interna de CO₂, razão da concentração de CO₂, eficiência do uso da água e na eficiência intrínseca do uso da água. Nos momentos de alta demanda respiratória, com absorção de CO₂ juntamente com a transpiração, ocorre a abertura estomática (SILVA; VAZ; SANTANA, 2024). Esse comportamento foi observado no tratamento T4, que apresentou os

maiores valores de C_i e Ca/C_i em comparação a T1, T5, T6 e T7, mas similares aos observados em T2, T3 e T8.

A soja, por possuir metabolismo do tipo C3, apresenta naturalmente menor eficiência fotossintética, quando comparada com as plantas C4. Enquanto a enzima Rubisco não estiver saturada, o aumento da concentração de CO_2 no ambiente resulta em maior taxa fotossintética (ZHENG et al., 2019). No entanto, após a saturação, as taxas fotossintéticas estabilizam ou diminuem (DRAG et al., 2020).

Tabela 3. Trocas gasosas de plantas da cultivar de soja 64I61RSF IPRO submetidas à coinoculação com bactérias promotoras de crescimento vegetal: taxa de assimilação líquida de CO_2 em $\mu mol\ CO_2\ m^{-2}\ s^{-1}$ (A), taxa de transpiração em $mmol\ H_2O\ m^{-2}\ s^{-1}$ (E), condutância estomática em $mol\ H_2O\ m^{-2}\ s^{-1}$ (gs), concentração interna de CO_2 em $\mu mol\ CO_2\ mol^{-1}$ (C_i), razão de concentração de CO_2 em $\mu mol\ CO_2\ mol^{-1}$ (Ca/C_i), eficiência do uso da água em $\mu mol\ CO_2\ mmol\ H_2O^{-1}$ (EUA), eficiência intrínseca do uso da água em $\mu mol\ CO_2\ mmol\ H_2O^{-1}$ (iEUA) e eficiência instantânea de carboxilação em $\mu mol\ CO_2\ \mu mol^{-1}$ (FC). Marechal Cândido Rondon, PR, 2023/2024

Tratamentos	A	Gs	E	C_i/C_a	C_i	EUA	iEUA	FC
T1	13,72	0,30	4,70	0,59 b	165,34 ab	2,96 b	43,79 b	0,078
T2	17,15	0,37	5,63	0,62 ab	165,89 ab	3,08 b	47,77 b	0,104
T3	16,96	0,37	5,42	0,65 ab	166,57 ab	3,15 ab	47,44 b	0,102
T4	16,58	0,40	5,67	0,68 a	173,23 a	2,92 b	43,40 b	0,096
T5	15,70	0,29	4,38	0,55 b	152,67 b	3,59 a	57,79 a	0,103
T6	16,49	0,38	5,85	0,58 b	164,84 ab	2,95 b	42,94 b	0,097
T7	16,47	0,37	5,53	0,54 b	166,73 ab	3,03 b	45,63 b	0,098
T8	15,78	0,33	5,07	0,65 ab	165,38 ab	3,19 ab	49,23 ab	0,096
Cv (%)	11,87	12,89	12,08	4,08	4,20	6,75	8,91	14,47

Letras minúsculas iguais, em cada coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.: T1 (controle) – sementes inoculadas com *Bradyrhizobium japonicum* (SEMIA 5079); T2 – *B. japonicum* (SEMIA 5079) + *Azospirillum brasilense* (Abv5/Abv6); T3 – *B. japonicum* (SEMIA 5079) + *Pseudomonas fluorescens* (ATCC 13525); T4 – *B. japonicum* (SEMIA 5079) + *Bacillus aryabhattai* (CBMAI 1120), *B. circulans* (CCT 7926) e *B. haynesii* (CCT 0026); T5 – *B. japonicum* (SEMIA 5079) + *B. amyloliquefaciens* (CNPSO 3202), *B. velezensis* (CNPSO 3602) e *B. thuringiensis* (CNPSO 3915); T6 – *B. japonicum* (SEMIA 5079) + *B. subtilis* (CNPMS B2084) e *B. megaterium* (CNPMS B119); T7 – *B. japonicum* (SEMIA 5079) + *B. aryabhattai* (CMAA 1363); T8 – *B. japonicum* (SEMIA 5079) + *A. brasilense* (Abv5/Abv6) + *P. fluorescens* (ATCC 13525)

Bulegon et al. (2016), relataram que a coinoculação via sementes, com *A. brasilense* com *B. japonicum*, aumentou a eficiência instantânea de carboxilação (Fc) e o uso de CO_2 pela soja. Entretanto, no presente estudo, não houve diferença significativa para Fc entre os tratamentos. Além disso, C_i e Ca/C_i em T2 foram estatisticamente semelhantes aos valores observados em T4.

A eficiência do uso da água (*EUA*) e a eficiência intrínseca do uso da água (*iEUA*) quantificam o quão bem a soja utiliza a água disponível para produzir biomassa (BULEGON et al., 2016; COSTA NETTO et al., 2024). No contexto deste estudo, T5 apresentou os maiores valores de *EUA* e *iEUA*, com incrementos entre 16,56% e 22,94% em relação aos tratamentos controle (T1), T2, T6, T7 e, principalmente, T4. No entanto, apesar desse maior aproveitamento da água, T5 exibiu os menores valores de C_i e Ca/C_i , indicando um fechamento estomático mais acentuado.

Por outro lado, T4 apresentou o comportamento oposto, com maiores valores de C_i e Ca/C_i , mas menores valores de *EUA* e *iEUA*, evidenciando uma relação inversa entre essas variáveis. Esse padrão sugere que, à medida que a eficiência hídrica aumenta, há uma tendência de redução na concentração interna de CO_2 dentro das condições ambientais que este estudo ocorreu, possivelmente devido a um controle estomático mais restritivo. Como consequência, essa limitação compromete as taxas fotossintéticas e impacta no rendimento da cultura (COSTA NETTO et al., 2024).

Na tabela 4 são apresentados os dados de teor relativo de clorofila (SPAD) em folhas de soja em função da coinoculação com BPCV. Verifica-se que não houve influência significativa entre os tratamentos esta variável pelo teste de Tukey a 5% de significância.

No presente estudo, observou-se um aumento médio de 12,96% nos teores relativos de clorofila do R3 para o R5, sem, contudo, haver diferença estatística ($F \leq 0,05$) entre os tratamentos. Esse resultado indica que a inoculação e a coinoculação mantiveram a estabilidade na síntese, sem comprometer a absorção dos nutrientes essenciais.

No trabalho de Solanki, Gurjar e Sharma (2023), foi relatado um aumento de 19% nos teores de clorofila aos 20 dias após a semeadura, seguido por um incremento de 11% aos 60 dias. Embora os autores não tenham discutido essa variação como uma tendência, os dados apresentados sugerem que a taxa de incremento dos teores de clorofila diminui à medida que a planta avança nos estádios fenológicos. Isso está relacionado à redistribuição dos recursos metabólicos para outros processos fisiológicos, como o enchimento de grãos. No entanto, essa hipótese precisaria ser investigada em estudos específicos que avaliem essa dinâmica ao longo de diferentes estádios fenológicos.

Tabela 4. Índice SPAD em folhas da cultivar de soja 64I61RSF IPRO submetida à coinoculação com bactérias promotoras de crescimento vegetal, nos estádios R3 e R5. Marechal Cândido Rondon, PR, 2023/2024

Tratamentos	SPAD _{R3}	SPAD _{R5}
T1	36,63	42,00
T2	36,68	41,80
T3	36,35	41,85
T4	35,65	41,50
T5	36,63	39,53
T6	37,45	41,33
T7	36,50	40,18
T8	37,00	42,60
Cv (%)	4,24	5,29

Letras minúsculas iguais, em cada coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.: T1 (controle) – sementes inoculadas com *Bradyrhizobium japonicum* (SEMIA 5079); T2 – *B. japonicum* (SEMIA 5079) + *Azospirillum brasilense* (Abv5/Abv6); T3 – *B. japonicum* (SEMIA 5079) + *Pseudomonas fluorescens* (ATCC 13525); T4 – *B. japonicum* (SEMIA 5079) + *Bacillus aryabhattai* (CBMAI 1120), *B. circulans* (CCT 7926) e *B. haynesii* (CCT 0026); T5 – *B. japonicum* (SEMIA 5079) + *B. amyloliquefaciens* (CNPSO 3202), *B. velezensis* (CNPSO 3602) e *B. thuringiensis* (CNPSO 3915); T6 – *B. japonicum* (SEMIA 5079) + *B. subtilis* (CNPMS B2084) e *B. megaterium* (CNPMS B119); T7 – *B. japonicum* (SEMIA 5079) + *B. aryabhattai* (CMAA 1363); T8 – *B. japonicum* (SEMIA 5079) + *A. brasilense* (Abv5/Abv6) + *P. fluorescens* (ATCC 13525).

Com base nos resultados verifica-se influência da coinoculação na cultura da soja com *B. japonicum*, *A. brasilense*, *P. fluorescens* e *Bacillus* em variáveis biométricas e trocas gasosas. Contudo, ainda são necessários mais estudos para maior entendimento das respostas em outras condições experimentais. Visando aprofundar a compreensão dessas interações, a Tabela 6 apresenta a correlação entre as variáveis morfofisiológicas avaliadas, permitindo identificar comportamentos integrados de resposta à coinoculação

Tabela 5. Correlação de Pearson entre variáveis morfofisiológicas da soja cultivar 64I61RSF IPRO coinoculada com bactérias promotoras de crescimento vegetal. SPAD R3: teor relativo de clorofila no estádio R3; SPAD R5: teor relativo de clorofila no estádio R5; AF: área foliar; D: diâmetro do caule; Alt: altura de planta; NO: número de nódulos; MSF: massa seca de folhas; MSC+P: massa seca do caule + pecíolo; MSR: massa seca radicular; MSPA: massa seca da parte aérea; MST: massa seca total; R/Pa: razão raiz/parte aérea; *A*: taxa assimilatória líquida de CO₂; *Gs*: condutância estomática; *E*: taxa de transpiração; *Ci/Ca*: razão entre concentração interna e atmosférica de CO₂; *Ci*: concentração interna de CO₂; *EUA*: eficiência do uso da água; *iEUA*: eficiência intrínseca do uso da água; *Fc*: eficiência instantânea de carboxilação, Marechal Cândido Rondon, PR, 2023/2024.

	SPAD R3	SPAD R5	AF	D	Alt	NO	MSF	MSC+P	MSR	MSPA	MST	R/Pa	<i>A</i>	<i>Gs</i>	<i>E</i>	<i>Ci/Ca</i>	<i>Ci</i>	<i>EUA</i>	<i>iEUA</i>	<i>Fc</i>
SPAD R3	1,00																			
SPAD R5	0,43*	1,00																		
AF	0,28	0,11	1,00																	
D	0,41*	0,38*	0,54*	1,00																
Alt	0,27	-0,03	0,50 *	0,33	1,00															
NO	0,07	-0,12	0,06	0,24	0,15	1,00														
MSF	0,37*	0,28	0,76*	0,56*	0,12	-0,07	1,00													
MSC+P	0,26	0,30	0,80*	0,76*	0,44*	-0,01	0,68*	1,00												
MSR	0,23	0,20	0,66*	0,69*	0,22	0,14	0,67*	0,81*	1,00											
MSPA	0,33	0,32	0,86*	0,73*	0,33	-0,03	0,88*	0,94*	0,82*	1,00										
MST	0,33	0,31	0,85*	0,74*	0,33	-0,02	0,87*	0,94*	0,85*	0,99*	1,00									
R/Pa	-0,09	-0,11	-0,28	-0,07	-0,46*	0,26	0,03	-0,39	0,22	-0,20*	-0,15	1,00								
<i>A</i>	0,34	0,04	0,30	0,44	0,17	0,01	0,31	0,34	0,41*	0,35	0,37*	0,10	1,00							
<i>Gs</i>	0,02	-0,00	0,22	0,25	-0,01	0,31	0,10	0,19	0,26	0,17	0,18	0,07	0,58*	1,00						
<i>E</i>	0,476*	0,18	0,47*	0,61*	0,30	0,11	0,43*	0,55*	0,53*	0,55*	0,56*	-0,03	0,84*	0,68*	1,00					
<i>Ci/Ca</i>	-0,37*	-0,11	-0,07	-0,21	-0,26	0,26	-0,20	-0,14	-0,15*	-0,18	-0,18	-0,01	-0,33	0,55*	-0,08	1,00				
<i>Ci</i>	-0,39*	-0,11	-0,10	-0,25	-0,24	0,24	-0,23	-0,17	-0,18*	-0,21	-0,21	-0,01	-0,42*	0,46*	-0,16	0,99*	1,00			
<i>EUA</i>	-0,37*	-0,27	-0,45*	-0,52*	-0,29	-0,19	-0,38*	-0,59*	-0,41*	-0,52*	-0,52*	0,21	-0,17	-0,48*	-0,67*	-0,35*	-0,32*	1,00		
<i>iEUA</i>	0,30	0,10	0,00	0,12	0,18	-0,28	0,14	0,07	0,07	0,10	0,10	0,01	0,18	-0,67*	-0,07	-0,98*	-0,95*	0,42	1,00	
<i>Fc</i>	0,41*	0,05	0,27	0,41*	0,23	-0,09	0,31	0,31	0,37*	0,34	0,35*	0,08	0,94*	0,28	0,70*	-0,62*	-0,70*	0,01	0,49*	1,00

Os coeficientes acompanhados de “*” indica significância estatística pelo teste t de Student a 5% de probabilidade ($p < 0,05$). Valores positivos indicam correlação direta entre as variáveis; valores negativos indicam correlação inversa. Coeficientes próximos de 1 ou -1 representam correlações fortes; valores próximos de 0 indicam fraca ou nenhuma correlação linear.

A correlação significativa entre SPAD R5 e SPAD R3 indica estabilidade nos teores de clorofila entre esses dois estádios do ciclo da soja. Esse comportamento está relacionado à ação das BPCV, contribuindo com planta por meio da FBN, solubilização de nutrientes e síntese de fitohormônios, conforme relatado por Vacheron et al. (2013) e Figueiredo et al. (2016). Esses mecanismos favorecem tanto a síntese quanto a manutenção da clorofila ao longo do desenvolvimento. Ainda que os tratamentos não tenham gerado diferenças significativas nas médias de SPAD em R3 e R5 conforme tabela 4, a correlação positiva entre os estádios sugere que o desempenho fisiológico individual das plantas teve papel mais determinante do que o efeito direto dos tratamentos, indicando um possível controle endógeno na manutenção da estabilidade fotossintética.

Além disso, a estabilidade observada nos índices SPAD estão relacionadas à dinâmica de atuação específica das BPCV ao longo do ciclo da cultura. No trabalho de Marchão et al., (2024), relata que a presença do *Bradyrhizobium elkanii* é a razão pela qual houve maior teor de clorofila durante o estágio vegetativo da cultura, enquanto *P. aryabhattai*, *B. haynesii* e *B. circulans* demonstram efeito mais expressivo em R4. Já *P. megaterium* e *B. subtilis* apresentam em R5. Essa alternância na atividade microbiana garante uma contribuição fisiológica contínua, o que reforça a manutenção dos teores de clorofila entre os estádios avaliados. Em complemento, *B. japonicum* por promover o acúmulo de nitrogênio e magnésio nas folhas, consequentemente há acréscimo e 6,51% nos teores de clorofila na fase inicial de desenvolvimento das vagens da soja (SUSS, 2020), o que confirma seu papel direto na sustentação da atividade fotossintética nesse período.

A atuação dos microrganismos na estabilidade dos índices SPAD está ligada à sua capacidade de promover ajustes metabólicos e ampliar a absorção de nutrientes essenciais. Nesse contexto, Guimarães, Klein e Klein (2023) relatam que *B. megaterium* e *Bacillus subtilis* aumentam significativamente os teores de nitrogênio e fósforo em folhas e grãos, favorecendo a nutrição vegetal e favorecendo à manutenção da pigmentação e da eficiência fotossintética ao longo do ciclo. Além disso, Chibeba et al. (2015) destacam que as BPCV estimulam o crescimento radicular, favorecendo a captação de nutrientes essenciais para a síntese de clorofila.

A manutenção dos níveis de clorofila ao longo do ciclo acompanha essas interações. Leite et al. (2023) evidenciam que a coinoculação com *Trichoderma* e *Bacillus* preserva índices elevados de SPAD, tanto em condições controladas quanto a campo. Jarecki; Bobrecka-Jamro (2019)

demonstram que a regulação da pigmentação ocorre de forma integrada ao longo dos estádios fenológicos.

A estabilidade do índice SPAD (teor relativo de clorofila) também é observada sob condições adversas. Pereira et al. (2020) apontam que, mesmo sob déficit hídrico, os índices de SPAD permanecem estáveis no milho, sugerindo que a pigmentação foliar pode ser regulada independentemente das variações ambientais. Esse comportamento se repete no presente estudo, onde as médias de SPAD não diferem entre os tratamentos (Tabela 4). A inoculação com *B. japonicum* e *A. brasilense*, associada ao bioativador, eleva os índices de SPAD em diferentes períodos do desenvolvimento, incluindo florescimento e enchimento de grãos (RÖSKE et al., 2022). Além disso, Barbosa et al. (2021) demonstram que *Bacillus subtilis* mantém níveis elevados de SPAD até R5, mesmo sob estresse, reforçando a estabilidade na clorofila foliar ao longo do ciclo.

A correlação significativa entre diâmetro do coleto e SPAD R3, SPAD R5 e área foliar indica que plantas apresentaram maior robustez estrutural, maior concentração de clorofila e maior expansão fotossintética. Esse padrão reflete a ação das BPCV na arquitetura vegetal e na regulação dos processos fisiológicos. Há relatos que a inoculação com *B. megaterium* e *Bacillus subtilis* aumenta o diâmetro do caule e o conteúdo foliar de nitrogênio e fósforo, nutrientes diretamente relacionados à produção de clorofila (OROZCO-MOSQUEDA et al., 2021). Esse efeito contribui para a relação observada entre diâmetro do coleto, SPAD e área foliar.

A arquitetura vegetal também acompanha a interação entre microrganismos e processos fisiológicos. Barbosa et al. (2021) atribuem o aumento do diâmetro do coleto à coinoculação com *B. japonicum* e *A. brasilense*, destacando o efeito sinérgico entre fixação biológica de nitrogênio e produção de fitormônios no favorecimento do crescimento estrutural e fisiológico das plantas. Resultados semelhantes foram observados por Leite et al. (2023), que evidenciam que o aumento da área foliar e do índice de clorofila está associado à robustez do caule, devido à influência dos microrganismos na absorção de nutrientes e na produção de fitormônios. Suss (2020) relata que o diâmetro do coleto da soja foi 16% superior na presença da coinoculação. A interação de *B. japonicum* na fixação de nitrogênio e *A. brasilense* na síntese de auxinas e citocininas favorece a relação entre diâmetro e área foliar, ajustando a estrutura da planta para maior eficiência fotossintética.

A inoculação impacta diretamente o acúmulo de biomassa. Guimarães; Klein (2023a) indicam que *Bacillus* spp. promove maior massa seca na parte aérea e no sistema radicular, refletindo no diâmetro do caule e na expansão da área foliar. Singh et al. (2021) e Singh et al. (2022) explicam esse efeito pela produção de fitormônios por *Bacillus* spp., incluindo auxinas, citocininas e giberelinas, que estimulam o crescimento da parte aérea e contribuem para o desenvolvimento da arquitetura vegetal. A pigmentação foliar responde à influência microbiana. Jarecki; Bobrecka-Jamro (2019) demonstram que a inoculação com *Bacillus* spp. eleva o índice de área foliar e impacta positivamente o SPAD, confirmando que parâmetros biométricos como diâmetro do caule e área foliar se correlacionam com a concentração de clorofila. Esse efeito resulta da eficiência nutricional promovida pelos microrganismos e da otimização do metabolismo fotossintético.

A correlação significativa entre altura e área foliar confirma que o crescimento da planta está diretamente associado à sua expansão fotossintética. As BPCV contribuem para desenvolvimento dessa arquitetura vegetal, corroborando para o crescimento da parte aérea e a capacidade de captação da luminosidade. A altura das plantas é acompanhada por maior massa foliar e maior teor de nutrientes, indicando que o desenvolvimento em altura contribui para a expansão foliar e reforça a relação funcional entre essas variáveis (OROZCO-MOSQUEDA et al., 2021).

A inoculação e coinoculação impactam diretamente o crescimento vegetativo. Barbosa et al. (2021) destacam que a altura das plantas foi incrementada com a coinoculação de *A. brasilense*, efeito atribuído à produção de auxinas, giberelinas e citocininas, levando a promoção do alongamento celular e expansão foliar. De forma semelhante, Solanki; Gurjar; Sharma (2023) relatam que a coinoculação com *Bacillus* resultou em maior altura, associado à maior disponibilidade de fósforo e à síntese de pigmentos e biomassa. Leite et al. (2023) mostram que o aumento da altura está acompanhado por maior área foliar, evidenciando a conexão entre crescimento e capacidade fotossintética. Jarecki; Bobrecka-Jamro (2019) observam incremento na área foliar após inoculação, indicando que a expansão foliar acompanha o desenvolvimento vegetativo da planta.

A correlação entre massa seca foliar com SPAD R3, diâmetro do coleto e área foliar confirma a relação entre arquitetura da planta, concentração de clorofila e acúmulo de biomassa. Embora a relação com SPAD seja moderada, o vínculo mais forte ocorre com área foliar e diâmetro

do caule, sugerindo que o desenvolvimento estrutural exerce maior influência no acúmulo de massa seca do que a variação da clorofila.

Barbosa et al. (2021) indicam que a elevação da massa seca foliar está relacionada ao maior acúmulo de nitrogênio e magnésio, elementos fundamentais para a síntese de clorofila e o desenvolvimento vegetativo, especialmente em coinoculação. O efeito dos microrganismos na absorção de nutrientes reflete diretamente no crescimento foliar, ampliando a eficiência fotossintética e o acúmulo de biomassa. Solanki; Gurjar; Sharma (2023) observaram que a massa de folhas foi significativamente maior nos tratamentos com *Bacillus*, indicando que o aumento da biomassa foliar acompanha a eficiência fisiológica estimulada pela solubilização de fósforo e produção de fitohormônios. A relação entre biomassa foliar e estrutura da planta também pode ser observada na interação com diâmetro do caule.

A expansão foliar é um dos principais fatores no acúmulo de biomassa. Leite et al. (2023) indicam que a coinoculação promove maior peso seco da parte aérea e maior volume radicular, reforçando que a interação entre crescimento vegetativo e metabolismo radicular determina a construção da biomassa. Embora os resultados não correlacionem diretamente SPAD e massa seca, os dados sugerem que o aumento da clorofila acompanha o crescimento da parte aérea, indicando a conexão entre fotossíntese e acúmulo de biomassa foliar. A relação com diâmetro do coleto reflete robustez estrutural. Guimarães; Klein; Klein (2023) apontam que *B. megaterium* e *Bacillus subtilis* elevaram significativamente a altura das plantas e a massa seca foliar, demonstrando a contribuição dos microrganismos nesse processo.

O efeito dos inoculantes na biomassa também se manifesta em ajustes biométricos. Jarecki; Bobrecka-Jamro (2019) relatam que a inoculação favorece a biomassa aérea, reforçando a conexão entre crescimento arquitetônico da planta, absorção de nutrientes e pigmentação foliar. Essa interação explica correlações moderadas entre SPAD, diâmetro do caule e massa seca foliar, pois a nutrição e o desenvolvimento da planta ocorrem de maneira integrada.

A correlação entre massa seca do coleto + pecíolo com área foliar, diâmetro do coleto, altura e massa seca foliar confirma que o acúmulo de biomassa nos tecidos da planta acompanha a expansão da parte aérea e o desenvolvimento da arquitetura. A robustez do coleto e a área foliar indicam que plantas mais vigorosas direcionam biomassa de forma eficiente para sustentação e crescimento vegetativo. A coinoculação impacta diretamente a distribuição da biomassa na planta. Barbosa (2021) relata que o incremento na massa seca da parte aérea ocorre principalmente pelo

desenvolvimento radicular, mas acompanha a estrutura do caule. Esse efeito pode ser atribuído às bactérias produtoras de fitormônios, que favorecem o acúmulo de biomassa em tecidos de suporte, como caule e pecíolo.

O crescimento vegetativo impulsiona a formação estrutural. Leite et al. (2023) demonstram que as coinoculações aumentam altura, área foliar e biomassa da parte aérea, reforçando a conexão entre arquitetura vegetal e alocação de matéria seca nos tecidos de suporte. Esse padrão sugere que a distribuição da biomassa não ocorre de maneira aleatória, mas sim ajustada às demandas fotossintéticas e estruturais da planta. A robustez do coleto está diretamente associada à eficiência de suporte e biomassa acumulada. Jarecki; Bobrecka-Jamro (2019) destacam que inoculantes promovem aumento da biomassa aérea e da área foliar, justificando a relação entre estrutura e alocação de biomassa nos tecidos de suporte. O vínculo entre diâmetro e expansão foliar indica que plantas mais desenvolvidas direcionam mais recursos para o crescimento do caule e pecíolo, garantindo equilíbrio entre sustentação e funcionalidade fotossintética.

O comportamento observado na análise reforça que a estrutura da planta e a distribuição da biomassa são processos interligados. O diâmetro do caule e a área foliar determinam a alocação de matéria seca na parte aérea, garantindo que o crescimento vegetativo acompanhe ajustes morfológicos e sustentação. A relação moderada com altura sugere que a expansão foliar é um dos principais fatores na construção da biomassa, refletindo a influência das BPCV na regulação fisiológica do metabolismo vegetal.

A correlação entre massa seca radicular com área foliar, diâmetro do coleto, massa seca foliar e massa seca do caule indica que um sistema radicular mais desenvolvido acompanha maior crescimento vegetativo e robustez estrutural. Essa relação sugere que a expansão das raízes está funcionalmente ligada ao desenvolvimento da parte aérea, refletindo na alocação integrada de biomassa e na eficiência fotossintética.

Barbosa (2021) atribui esse efeito ao sinergismo entre bactérias promotoras de crescimento que elevam a produção de AIA, estimulando o crescimento radicular e indiretamente favorecendo o acúmulo de biomassa aérea. Solanki; Gurjar; Sharma (2023) confirmam essa resposta ao demonstrar que a inoculação com *Bacillus* e *Paraburkholderia* resultou em maior massa radicular em diferentes tratamentos. A inoculação com BPCV também afeta diretamente o metabolismo da raiz. Röske et al. (2022) apontam que a inoculação favorece o acúmulo de nitrogênio e clorofila,

impactando o crescimento das raízes. Esse desenvolvimento radicular otimiza a absorção de nutrientes e água, refletindo no aumento da biomassa em outras partes da planta.

A coinoculação estimula o crescimento radicular. Leite et al. (2023) relatam que a coinoculação promoveu um incremento de 25,8% no volume radicular, reforçando que a relação entre raízes e parte aérea está diretamente ligada à absorção de nutrientes e ao acúmulo de biomassa. O ajuste fisiológico promovido pelos microrganismos sustenta esse crescimento coordenado. A interação simbiótica da planta com os microrganismos influencia diretamente o desenvolvimento das raízes. Jarecki; Bobrecka-Jamro (2019) relatam que os inoculantes promovem maior biomassa radicular, reforçando que microrganismos não apenas aprimoram a absorção de nutrientes, mas também estimulam processos estruturais que ampliam o sistema radicular.

O efeito das BPCV sobre as raízes está associado à regulação hormonal. Suss (2020) descreve que a coinoculação aumentou a massa seca das raízes devido à produção de fitormônios por *A. brasilense*. Essa influência hormonal justifica a forte correlação entre massa seca radicular e massa seca do caule, indicando que plantas que investiram mais no sistema radicular também direcionam maior biomassa para a parte aérea. A relação com diâmetro do coleto e massa seca do caule sugere que o crescimento das raízes ajustou conforme à necessidade de suporte para a biomassa aérea, garantindo equilíbrio entre absorção de recursos e expansão vegetativa.

A correlação da massa seca da parte aérea com área foliar, diâmetro do coleto, massa seca foliar, massa seca do caule e massa seca radicular indica que o crescimento da parte aérea resulta da interação entre estrutura, captação de luz e distribuição de biomassa. Sugerindo plantas mais desenvolvidas direcionando a biomassa de forma equilibrada entre órgãos vegetativos, fortalecendo sua funcionalidade fotossintética e a arquitetura. A coinoculação influencia indiretamente essa dinâmica. Barbosa (2021) aponta que o incremento da massa seca da parte aérea está relacionado à melhoria do sistema radicular, refletindo na absorção de nutrientes e no crescimento vegetativo. Resultados semelhantes foram observados por Orozco-Mosqueda et al. (2021), que demonstram que a inoculação com *Bacillus* favoreceu o desenvolvimento da parte aérea.

Leite et al. (2023) indicam que a coinoculação gerou aumentos consistentes de biomassa total e produtividade, reforçando que área foliar, robustez do caule e massa radicular exercem papel determinante no crescimento da parte aérea. O ajuste entre estrutura e fisiologia favorece um desenvolvimento uniforme e otimiza a conversão de recursos. A influência dos inoculantes na

biomassa e produtividade reforça essa relação funcional. Jarecki; Bobrecka-Jamro (2019) relatam que as BPCV impactam positivamente a massa total da planta, demonstrando que microrganismos promovem ajustes fisiológicos que integram crescimento vegetativo e alocação de biomassa. O fortalecimento da estrutura vegetal acompanha a distribuição eficiente de matéria seca, consolidando o efeito da inoculação sobre o desenvolvimento.

O comportamento observado na análise indica que o crescimento da parte aérea esteve ligado à integração entre área foliar, caule e sistema radicular. A inoculação com BPCV ajustou esse equilíbrio ao otimizar a nutrição e estrutura, garantindo que o crescimento vegetativo acompanhe a expansão dos tecidos. A correlação entre esses fatores sugere regulação no acúmulo de biomassa, refletindo a resposta da planta ao manejo biológico.

A correlação da massa seca total com área foliar, diâmetro do coleto, massa seca foliar, massa seca do caule, massa seca radicular e massa seca da parte aérea indica que o acúmulo de biomassa é resultado da interação entre estrutura, capacidade fotossintética e alocação de carbono. Os inoculantes atuaram diretamente nesse processo, ajustando mecanismos fisiológicos que favoreceram o crescimento integrado.

Solanki; Gurjar; Sharma (2023) demonstram que os *Bacillus* e *Paraburkholderia* promoveram maior massa seca total em diferentes tratamentos, principalmente por meio do incremento de raiz, caule e folha. De forma semelhante, Röske et al. (2022) indicam que a massa total foi favorecida nos tratamentos com coinoculação, especialmente na presença de bioativador, reforçando que esse ganho é resultado do desempenho conjunto das variáveis estruturais e metabólicas. O impacto da inoculação na biomassa total acompanhou ajustes fisiológicos. Suss (2020) destaca que incrementos significativos na massa seca total estão associados à maior FBN e à produção de fitohormônios. Esses reguladores modularam a divisão celular e a expansão da parte aérea, garantindo que o desenvolvimento vegetativo ocorra de maneira coordenada entre folhas, caule e raízes.

Leite et al. (2023) relatam ganhos na massa seca total e na produtividade com coinoculação, demonstrando que área foliar, robustez do caule e desenvolvimento radicular estão interligados na construção da biomassa. O ajuste morfológico promovido pelos microrganismos permitiu que a planta maximizasse sua eficiência na captação de luz e na conversão de recursos em matéria seca. A relação entre crescimento e distribuição de biomassa se manifestou na resposta dos inoculantes sobre a estrutura da planta. Jarecki; Bobrecka-Jamro (2019) indicam que a inoculação favorece o

rendimento e a biomassa total, reforçando que a resposta fisiológica da planta está associada à composição do inoculante e à otimização dos processos metabólicos.

O comportamento observado na análise demonstra que o acúmulo de biomassa total é produto de ajustes simultâneos entre estrutura e metabolismo. As BPCV influenciaram não apenas a nutrição, mas também a distribuição eficiente de matéria seca entre os órgãos vegetativos, garantindo que a planta maximize seu potencial produtivo e sua adaptação às condições ambientais.

A correlação negativa entre a razão raiz/parte aérea e altura indica que plantas mais altas tendem a direcionar proporcionalmente menos biomassa para o sistema radicular. Esse padrão sugere que o crescimento vegetativo modula a distribuição de biomassa, refletindo o impacto das formulações microbianas na alocação de carbono e nutrientes entre raiz e parte aérea.

Leite et al. (2023) demonstram que a coinoculação promove aumento simultâneo da altura e do volume radicular, indicando que os ajustes na alocação de biomassa acompanham o desenvolvimento da parte aérea, o que não é demonstrado nesse trabalho. Esse efeito reforça que a inoculação pode influenciar a relação entre crescimento vegetativo e estrutura radicular, determinando variações na razão raiz/parte aérea. Segundo Barbosa et al. (2021) a coinoculação favorece principalmente o desenvolvimento radicular, o que pode alterar essa relação ao modificar a distribuição de biomassa entre os compartimentos da planta.

A transpiração correlacionou-se positivamente com SPAD R3, área foliar, diâmetro do coleto, massas secas foliar, do caule, radicular, da parte aérea e total, além da assimilação líquida de CO₂ e condutância estomática. o que sugere que a transpiração acompanhou o desempenho geral da planta em termos de crescimento vegetativo e trocas gasosas. A correlação com SPAD pode estar relacionada à maior movimentação de nutrientes como magnésio e nitrogênio, essenciais à formação de pigmentos fotossintéticos, favorecida pelo fluxo transpiratório (TAIZ et al., 2017). A associação encontrada reflete que plantas com maior transpiração também apresentaram maior índice de clorofila foliar, sem que se estabeleça relação de causa e efeito.

As correlações com assimilação líquida de CO₂ e condutância estomática são coerentes com o controle estomático conjunto sobre a entrada de CO₂ e a perda de água. Em plantas sem restrição hídrica, a maior condutância tende a favorecer tanto a transpiração quanto a fotossíntese (FAGAN et al., 2015), o que explica a associação positiva observada. O comportamento conjunto da transpiração com variáveis estruturais reforça que, no presente estudo, a perda hídrica ocorreu de forma proporcional ao desenvolvimento da planta. A área foliar e o acúmulo de biomassa

estiveram associados à maior transpiração, sugerindo que plantas com maior porte também transpiram mais absorção de nutrientes e crescimento (TAIZ et al., 2017).

O comportamento observado está associado indiretamente à atuação das BPCV sobre processos fisiológicos e estruturais. Guimarães et al. (2018) destacam que essas bactérias influenciam múltiplos mecanismos simultaneamente, como o enraizamento e a atenuação do estresse oxidativo, por meio da produção de fitohormônios e da enzima ACC- desaminase, o que indiretamente, contribui para a regulação estomática, o que explica as correlações observadas entre a transpiração e os atributos estruturais e fisiológicos da planta. Segundo Lopes et al. (2021), microrganismos promotores de crescimento modulam processos fisiológicos por meio da produção de fitormônios e enzimas, favorecendo o desempenho vegetal. Rondina et al. (2020) observaram que a coinoculação com *A. brasilense* contribuiu para o desenvolvimento radicular e aumento da absorção de água, o que sustenta taxas de transpiração mais elevadas.

A correlação da concentração interna de CO₂ com as variáveis SPAD R3, assimilação líquida de CO₂, condutância estomática e razão *Ci/Ca* evidencia ajustes fisiológicos indiretos associados à presença dos microrganismos promotores de crescimento. A relação negativa entre *Ci* e SPAD R3, bem como entre *Ci* e assimilação líquida de CO₂, indica que o aumento da concentração de CO₂ no mesofilo não resultou, necessariamente, em maior taxa de fixação de carbono. Sugerindo limitação bioquímica na fotossíntese, refletindo acúmulo de CO₂ no mesofilo foliar devido à limitação do ciclo de Calvin, condição de saturação fisiológica da fotossíntese em valores elevados de *Ci*. (TAIZ et al., 2017).

A presença de microrganismos promotores de crescimento contribuiu indiretamente para o comportamento observado. Guimarães et al. (2018) destacam que bactérias como *Azospirillum* e *Bacillus* produzem auxinas, giberelinas e citocininas, hormônios vegetais que favorecem o crescimento e manutenção de tecidos foliares. De modo semelhante, Cipriani et al. (2025) descrevem que esses compostos atuam na preservação da fisiologia vegetal e sustentam o desenvolvimento sob diferentes condições. Tais efeitos auxiliaram indiretamente na manutenção da abertura estomática em alguns tratamentos, embora o acúmulo de CO₂ interno indique que esse aporte não foi acompanhado por incremento proporcional na atividade fotossintética.

Em estudo conduzido por Bulegon et al. (2019), a aplicação de *A. brasilense* elevou a assimilação líquida de CO₂ mesmo em condições de estresse, sem alteração significativa na concentração interna de CO₂, destacando que a eficiência fotossintética pode variar

independentemente de C_i , quando há estímulo funcional sobre o aparato enzimático. Essa interpretação sustenta que valores elevados de C_i isoladamente não representam ganho fisiológico se não estiverem acompanhados de assimilação líquida proporcional.

A razão C_i/C_a apresentou a correlação mais forte com C_i , indicando que a concentração interna de CO_2 e sua disponibilidade atmosférica estão relacionados. Esse comportamento revela que, embora a entrada de CO_2 tenha sido favorecida, seu aproveitamento não foi proporcional, sugerindo limitação em etapas bioquímicas da fotossíntese. Röske et al. (2022) relataram que, embora não tenham sido observadas diferenças estatísticas, houve tendência de variação em C_i , g_s e A entre os tratamentos com coinoculação. Esse padrão reforça que a interpretação das variáveis fisiológicas deve considerar não apenas a entrada de CO_2 (C_i), mas também sua relação com a assimilação líquida e a condutância estomática. O acúmulo interno de carbono, quando não acompanhado por resposta fotossintética, indica desacoplamento entre difusão e carboxilação, revelando a importância de se analisar essas variáveis como parte de um sistema funcional integrado.

A correlação observada da razão de concentração de CO_2 (C_a/C_i) com o índice SPAD R3, bem como com a condutância estomática, sugerindo que compartilha comportamentos relacionados ao equilíbrio entre entrada e acúmulo de carbono na folha. A relação negativa entre C_a/C_i e SPAD R3 indica que, em condições em que o teor relativo de clorofila ativa foi menor, a planta apresentou maior razão entre o CO_2 atmosférico e o interno, sugerindo que variações no conteúdo de pigmento fotossintético estão associadas a mudanças no aproveitamento do CO_2 disponível. Essa correlação sugere que C_a/C_i pode funcionar como indicador funcional de ajustes na capacidade de assimilação de carbono, especialmente quando analisada em conjunto com variáveis ligadas a manutenção e síntese de clorofila. Röske et al. (2022) observaram valores reduzidos de SPAD na fase R6 em plantas inoculadas, atribuídos à mobilização de nitrogênio para os grãos, prejudicando a manutenção da clorofila nas folhas. De modo complementar, Bulegon et al. (2019) verificaram que a inoculação com *A. brasilense* contribuiu para a manutenção da assimilação de CO_2 e maior eficiência no uso da água em soja sob estresse hídrico, mesmo sem alterações significativas em g_s ou C_i . Esses resultados reforçam que o desempenho fisiológico da planta pode ser afetado por mecanismos coordenados, nem sempre captados por variáveis isoladas, e que a razão C_a/C_i torna como opção de indicador desses ajustes.

A correlação positiva entre Ca/Ci e a condutância estomática sugere que a maior abertura estomática (g_s) favoreceu a entrada de CO_2 , mas sem o devido aproveitamento bioquímico, elevando a concentração interna de CO_2 . Essa condição indica um desbalanceamento entre a entrada do carbono e o seu metabolismo, o que compromete a eficiência fotossintética. Taiz et al. (2017) explicam que a razão entre as concentrações interna e atmosférica de CO_2 (Ci/Ca) reflete o equilíbrio funcional entre a entrada de carbono via estômatos e sua fixação bioquímica durante a fotossíntese, permitindo interpretações sobre a eficiência de uso do CO_2 pela planta. Nesse contexto, valores mais elevados de Ca/Ci podem indicar limitação na assimilação do carbono disponível, mesmo com difusão eficiente.

Cipriani et al. (2025) relatam que a inoculação com *Bacillus aryabhattai* promove o crescimento da parte aérea da soja sob diferentes condições térmicas e hídricas, por meio de mecanismos como a produção de AIA e excreção de amônia. Orozco-Mosqueda et al. (2021) complementam que tais microrganismos atuam em múltiplas vias do metabolismo vegetal, afetando indiretamente a fotossíntese e a eficiência no uso de carbono. Guimarães et al. (2018) descrevem que as BPCV, por meio da produção de fitormônios, ACC-deaminase e ação sobre pigmentos, favorecem o desempenho fotossintético e a conservação foliar em diversos contextos fisiológicos. Assim, a razão Ca/Ci se destaca como variável integradora, capaz de revelar ajustes fisiológicos coordenados que parâmetros isolados como SPAD e g_s podem não captar de forma completa.

A correlação negativa da eficiência do uso da água (EUA) com variáveis como SPAD R3, área foliar, diâmetro do coleto, biomassa, condutância estomática, transpiração, razão Ca/Ci e concentração interna de CO_2 indica que o crescimento vegetativo mais intenso está associado a menor eficiência fisiológica na conversão da água transpirada em assimilação líquida de carbono.

A expansão foliar e a produção de biomassa requerem maior suprimento de água para sustentação metabólica. Assim, é natural que a transpiração e a condutância estomática apresentem relação inversa com a eficiência do uso da água. Conforme apresentado por Taiz et al. (2017), em plantas C3 como a soja, há uma alta razão entre o volume de água perdido por transpiração e o volume de CO_2 fixado pela fotossíntese, devido a fatores anatômicos e fisiológicos que limitam a difusão e assimilação do carbono. Esse desbalanço contribui aumento na condutância estomática elevação de Ci , mas nem sempre resultem em maior assimilação líquida. Essa dinâmica é observada nessa correlação, onde valores mais elevados de Ci e da razão Ca/Ci correlacionaram-

se negativamente com a eficiência do uso da água, indicando variáveis inversamente proporcionais entre a absorção de carbono e sua conversão efetiva em biomassa.

Em estudo com soja, Röske et al. (2022) relataram maior eficiência do uso da água em plantas coinoculadas e tratadas com bioativador, associada à menor condutância estomática e transpiração. Resultado semelhante foi descrito por Bulegon et al. (2019) sob condições de déficit hídrico, em coinoculação com *A. brasilense*. Embora os efeitos sejam contrastantes aos apresentados na correlação nesse estudo, o padrão fisiológico é compatível, uma vez que a eficiência hídrica é reduzida quando há aumento da perda de água não é acompanhado por aumento proporcional da biomassa.

O comportamento fisiológico observado pode estar vinculado a estímulos mediados indiretamente por BPCV. Segundo Cipriani et al. (2025), esses microrganismos promovem o crescimento vegetal por meio da síntese de auxinas, giberelinas, citocininas, poliaminas e pela ação da enzima ACC-deaminase, favorecendo a expansão foliar, o engrossamento do caule e o acúmulo de biomassa. De modo compatível, Leite et al. (2023) relataram que a coinoculação com *T. asperellum* e *B. amyloliquefaciens* promoveu aumento de biomassa, condutância estomática, transpiração e taxa fotossintética em soja. Tais respostas demonstram que estímulos microbianos interferem no metabolismo vegetal e o consumo de água, o que, no presente estudo, se refletiu em padrão fisiológico correlacionado à redução da eficiência no uso hídrico não sendo acompanhada por incremento proporcional em assimilação ou condutância estomática. Complementarmente, Lopes et al. (2021) relatam que algumas BPCV formam biofilmes por meio da produção de exopolissacarídeos, na qual promove alterações na zona radicular levando a retenção de umidade e a dinâmica da água no solo. Tais modificações podem também atuar na fisiologia da planta ampliando a interface de absorção e influenciando a eficiência do uso hídrico.

A correlação negativa entre a eficiência intrínseca do uso da água (*iEUA*) e as variáveis condutância estomática (*gs*), concentração interna de CO₂ (*Ci*) e razão *Ci/Ca* indica que o desempenho hídrico da soja esteve associado ao contraste apresentado entre a entrada de CO₂ na folha e sua assimilação efetiva. Como *iEUA* é expressa pela razão entre a taxa de assimilação líquida de CO₂ (*A*) e *gs*. Dentro das condições apresentadas nesse estudo, valores mais baixos de *iEUA* sugerem que o aumento na *gs* e na *Ci* não foi acompanhado por uma resposta equivalente em *A*. Esse contraste compromete o uso fisiológico da água, pois a planta perde mais água por transpiração sem ganho proporcional em assimilação de carbono.

Esse comportamento é característico de plantas C3, como a soja, especialmente em situações nas quais o acúmulo de CO₂ interno não resulta em maior fixação de carbono por limitação bioquímica da Rubisco ou do metabolismo secundário (TAIZ et al., 2017). Quando isso ocorre, a planta mantém os estômatos abertos, elevando a perda de água por transpiração, mas sem ganho real em assimilação de carbono, reduzindo a *iEUA*. Esse desacoplamento entre difusão e assimilação também foi evidenciado por Drag et al. (2020), que observaram aumento de *Ci* mesmo após estabilização da taxa fotossintética em resposta à elevação de CO₂ atmosférico, apontando limitação metabólica como fator determinante da queda da eficiência fisiológica.

Complementarmente, Costa Netto et al. (2024) reforçam que variações em *gs* e *Ci*, ao alterarem a concentração de CO₂ na câmara subestomática, impactam diretamente a *iEUA*, destacando respostas momentâneas da planta às condições ambientais e fisiológicas. No presente estudo, a forte correlação negativa entre *iEUA* e *Ci* corrobora essa dinâmica, evidenciando que a maior concentração de CO₂ interno não implicou em maior assimilação, mas sim em baixa eficiência hídrica, possivelmente por limitações bioquímicas à fixação do carbono. Ainda segundo esses autores, aumentos em *gs* não resultam necessariamente em redução da *iEUA*, sendo o efeito condicionado à manutenção da demanda fotossintética e à integridade funcional dos tecidos fotossintéticos.

Bulegon et al. (2019) observaram que a coinoculação com *A. brasilense* resultou em maior *iEUA* mesmo sem estresse hídrico, indicando que o microrganismo pode contribuir para uma maior eficiência fisiológica. Essa resposta tem sido associada, em parte, à atuação hormonal mediada por fitormônios como o AIA e o ABA, reconhecidos por sua influência na modulação estomática e preservação da fotossíntese sob diferentes condições ambientais (TAIZ et al., 2017). Esse comportamento ajuda a explicar a correlação negativa observada entre *iEUA* e *gs*, *Ci* e *Ci/Ca* no presente trabalho, indicando maior eficiência fisiológica associada à modulação da abertura estomática e melhor uso da água.

Leite et al. (2024), ao estudarem a coinoculação com *T. asperellum* e *B. amyloliquefaciens*, relataram alterações morfofisiológicas em soja, como maior crescimento da parte aérea e maior aproveitamento dos recursos hídricos e nutricionais. Esses ajustes fisiológicos, promovidos pela interação rizosférica, resultaram em maior desempenho produtivo e reforçam a importância do equilíbrio entre entrada e aproveitamento do CO₂ para a eficiência hídrica da planta, o que se alinha ao padrão de correlação observado neste experimento.

A correlação observada da eficiência instantânea de carboxilação (F_c) com as variáveis SPAD R3, diâmetro do coleto, massa seca radicular, massa seca total, assimilação líquida de CO_2 (A), transpiração (E), razão Ca/C_i , concentração interna de CO_2 (C_i) e eficiência intrínseca do uso da água ($iEUA$) indica que, no presente experimento, a variação de F_c esteve funcionalmente associada ao desempenho fotossintético, à redistribuição de biomassa e à regulação das trocas gasosas da soja.

A F_c , por representar a razão entre A e C_i , é diretamente influenciada pela capacidade da planta em captar e fixar o CO_2 disponível. De acordo com Taiz et al. (2017), os principais fatores que controlam a taxa de assimilação em plantas C3 são a difusão de CO_2 até o estroma e a atividade da enzima Rubisco, cujo desempenho é sensível a variações em abertura estomática, disponibilidade de nutrientes e modulação hormonal. No presente estudo, a forte correlação positiva entre F_c e A , associada à redução de C_i e da razão Ca/C_i , sugere que o aparato fotossintético esteve funcionalmente ajustado para manter a fixação ativa mesmo sob limitação interna de CO_2 , indicando atuação integrada entre estômatos, mesófilo e ciclo de Calvin.

A associação positiva entre F_c e SPAD R3, bem como com variáveis estruturais como biomassa e diâmetro do coleto, reforça a ligação entre o aumento da assimilação e o acúmulo de compostos fotossintetizados, direcionados ao crescimento da parte aérea e radicular. Tais efeitos foram mediados pelas formulações microbianas aplicadas. O'Callaghan et al. (2022) relacionam a atuação conjunta de *Azospirillum* e *Bradyrhizobium* ao crescimento radicular, modulação hormonal e absorção de nutrientes em soja. Fatores que, em conjunto, oferecem base funcional para os ajustes fisiológicos observados, como a maior eficiência na fixação de carbono e o equilíbrio nas trocas gasosas.

A correlação entre F_c , $iEUA$ e E observada na Tabela 6 indica que a eficiência de carboxilação esteve associada à manutenção da assimilação com menor custo hídrico, sugerindo controle estomático eficiente na sincronia entre fixação de carbono e perda de água. Esse comportamento reflete ajustes fisiológicos mediados indiretamente pela coinoculação, favorecendo o equilíbrio nas trocas gasosas. Em estudo com soja, em déficit hídrico, Bulegon et al. (2019) observaram que plantas com *A. brasilense* apresentaram menor transpiração e maior eficiência no uso da água, com manutenção da assimilação, o que reforça que microrganismos contribuem para a regulação estomática. Orozco-Mosqueda et al. (2021) descrevem que *Azospirillum* e *Pseudomonas* atuam indiretamente na fisiologia vegetal por meio das rotas

hormonais, como a produção de AIA e ácidos orgânicos que por sua vez, influenciam nos mecanismos relacionados à condutância estomática, contribuindo para os ajustes observados neste experimento.

4.4. CONCLUSÕES

- Diferentes formulações de BPCV resultaram em respostas distintas em características biométricas e fisiológicas da soja.
- A coinoculação com *A. brasilense* promoveu maior razão raiz/parte aérea em soja sob condição de estresse hídrico.
- De mesmo modo as formulações contendo *Bacillus* interferiram nas trocas gasosas, principalmente a relação Ca/Ci e a eficiência no uso da água.
- O crescimento vegetativo apresentou associação direta com parâmetros fisiológicos, destacando-se as relações entre diâmetro do caule, área foliar, massa seca e teores de clorofila.

4.5. REFERÊNCIAS

- ALDRICH, J. Correlations genuine and spurious in Pearson and Yule. **Statistical Science**, v. 10, n. 4, p. 364–376, 1995
- ANPIIBIO – Associação Nacional de Promoção e Inovação da Indústria de Biológicos. **Estatísticas de mercado**. Disponível em: <https://anpiibio.org.br/estatisticas/>. Acesso em: 08 jul. 2024.
- BARBOSA, J. Z. et al. Meta-analysis reveals benefits of co-inoculation of soybean with *Azospirillum brasilense* and *Bradyrhizobium* spp. in Brazil. **Applied Soil Ecology**, v. 163, n. February, 2021.
- BULEGON, L. G. et al. Crescimento e Trocas Gasosas no Período Vegetativo da Soja Inoculada com Bactérias Diazotróficas. **Nativa**, v. 4, n. 5, p. 277–286, 31 out. 2016.
- BULEGON, L. G. et al. Physiological responses of *Urochloa ruziziensis* inoculated with *Azospirillum brasilense* to severe drought and rehydration conditions. **Australian Journal of Crop Science**, v. 11, n. 10, p. 1283–1289, 2017.

BULEGON, L. G. et al. Soybean responses to *Azospirillum brasilense* and plant regulators in drought conditions. **Revista Brasileira de Ciencias Agrarias**, v. 14, n. 4, 2019.

CAMPOS, Arnaldo de. **O custo da soja para o Brasil: renúncias fiscais, subsídios e isenções da cadeia produtiva**. S.I: Jambo Estúdio, 2023. 46 p.

CARCIOCHI, W. D. et al. Soybean yield, biological N₂ fixation and seed composition responses to additional inoculation in the United States. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, 1 dez. 2019.

CHATTARAJ, S. et al. Employing plant growth-promoting rhizobacteria for abiotic stress mitigation in plants: with a focus on drought stress. **Discover Applied Sciences**, v. 7, n. 1, 1 jan. 2025.

CHIBEBA, A. et al. Co-inoculation of soybean with *Bradyrhizobium* and *Azospirillum* promotes early nodulation. **American Journal of Plant Sciences**, v. 6, p. 1641-1649, 2015.

COSTA NETTO, J. R. et al. Soybean water-use efficiency increased over 80 years of breeding. **Crop Science**, 1 jan. 2024.

CREMER, J. et al. Chemotaxis as a navigation strategy to boost range expansion. **Nature**, v. 575, n. 7784, p. 658–663, 28 nov. 2019.

CRUZ, C. D. **Programa Genes - Aplicativo Computacional em Genética e Estatística**. VIÇOSA, MG: EDITORA UFV, 1997. v1. 442 p.

DRAK, D. W. et al. Soybean photosynthetic and biomass responses to carbon dioxide concentrations ranging from pre-industrial to the distant future. **Journal of Experimental Botany**, v. 71, n. 12, p. 3690–3700, 22 jun. 2020.

DU, J. X. et al. iScience Synergistically promoting plant health by harnessing synthetic microbial communities and prebiotics. **ISCIENCE**, v. 24, p. 102918, 2021.

DU, Y.; SCHERES, B. Lateral root formation and the multiple roles of auxin. **Journal of Experimental Botany**, v. 69, n. 2, p. 155–167, 1 jan. 2018.

FAGAN, E. B. et al. **Fisiologia vegetal: Reguladores Vegetais**. Piracicaba: Andrei, 2015.

FERREIRA, D. F. Análise estatística por meio do SISVAR (Sistema para Análise de Variância) para Windows versão 4.0. In: REUNIÃO ANUAL DA REGIÃO BRASILEIRA DA SOCIEDADE INTERNACIONAL DE BIOMETRIA, 45., 2000, São Carlos. Anais... **São Carlos: UFSCar**, 2000. p. 255- 258.

FIGUEIREDO, M. V. B et al. **Plant growth-promoting rhizobacteria: key mechanisms of action**. In: MAHESHWARI, D. K. (ed.). *Plant growth and health promoting bacteria*. Berlin: Springer, 2016. p. 21–43.

GUIMARÃES, V. F. et al. Bactérias Promotoras de Crescimento. **CIÊNCIAS AGRÁRIAS: ética do cuidado, legislação e tecnologia na agropecuária**, n. March, p. 212, 2018.

GUIMARÃES, V. F.; KLEIN, J. Eficiência agronômica dos inoculantes líquido e turfosos, formulados a base de *Pseudomonas fluorescens*, para a cultura da soja via tratamento de sementes, associado à adubação fosfatada. **OBSERVATÓRIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA**, v. 21, n. 9, p. 11162–11203, 11 set. 2023b.

GUIMARÃES, V. F.; KLEIN, J. Inoculante líquido contendo *B. megaterium* e *B. subtilis* é eficiente em promover crescimento e disponibilizar fósforo para a soja. **DELOS: DESARROLLO LOCAL SOSTENIBLE**, v. 16, n. 46, p. 2029–2060, 4 set. 2023a.

GUIMARÃES, V. F.; KLEIN, J.; KLEIN, D. K. Promoção de crescimento e solubilização de fósforo, por *B. megaterium* e *B. subtilis*, via inoculação de sementes, associado à fertilização fosfatada, na cultura da soja. **Research, Society and Development**, v. 12, n. 2, p., 2023.

HAIG, B. D. **What is a spurious correlation?** In: SALKIND, N. J. (org.). *Encyclopedia of measurement and statistics*. Thousand Oaks: SAGE Publications, 2007. p. 887–890.

HUNGRIA, M; NOGUEIRA, M. A. Tecnologia de inoculação na cultura da soja: mitos, verdades e desafios. In: FUNDAÇÃO MT. **Boletim de pesquisa**: 2019/2020. Rondonópolis: Fundação Mt, 2019. p. 51-62.

INSALL, R. H.; PASCHKE, P.; TWEEDY, L. Steering yourself by the bootstraps: how cells create their own gradients for chemotaxis. **Trends in Cell Biology**, v. 32, n. 7, p. 585–596, 1 jul. 2022.

JARECKI, W.; BOBRECKA-JAMRO, D. Influence of seed inoculation with commercial bacterial inoculants (*Bradyrhizobium japonicum*) on growth and yield of soybean. **Legume Research**, v. 42, n. 5, p. 688–693, 1 out. 2019.

KÖPPEN BRASIL. **Köppen Brasil: classificação climática**. Disponível em: <https://koppenbrasil.github.io/>. Acesso em: 10 set. 2024.

KOZAK, M. What is strong correlation? *Teaching Statistics*, v. 31, n. 3, p. 85–86, 2009.

LEITE, R. DA C. et al. Co-inoculation of soybean with *Bradyrhizobium* spp. and Amazonian strains of *Trichoderma asperellum* and *Bacillus amyloliquefaciens* increases the productivity and profitability of the crop. **Crop Science**, v. 64, n. 1, p. 422–441, 1 jan. 2024.

LIU, Y. et al. Root colonization by beneficial rhizobacteria. **FEMS Microbiology Reviews**, v. 48, n. 1, 1 jan. 2024.

LOPES, M. J. DOS S. et al. Successful Plant Growth-Promoting Microbes: Inoculation Methods and Abiotic Factors. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 5, 25 fev. 2021.

MAPA. **Projeções do agronegócio: brasil-2023/2024 a 2033/2034**. Brasília: Mapa, 2024. 77 p.

MARCHÃO, R. L. et al. Complementary Inoculation of Emerged Soybean with the Growth-Promoting Bacteria *Azospirillum*, *Pseudomonas*, *Priestia* and *Bacillus*. **preprints.org**, p. 1–12, 12 dez. 2024.

MARKET DATA FORECAST. **Latin America Agricultural Inoculants Market – Growth, Trends, and Forecast (2024–2029)**. Disponível em: <https://www.marketdataforecast.com/market-reports/latin-america-agricultural-inoculants-market>. Acesso em: 9 jul. 2025.

MESQUITA, J. DE; SILVA, T. P. DA. DESENVOLVIMENTO DA SOJA SUBMETIDA A DIFERENTES FORMAS DE INOCULAÇÃO E COINOCULAÇÃO COM *Bradyrhizobium japonicum* E *Azospirillum brasilense*. **Revista Agroveterinária do Sul de Minas**, p. 1–21, 2023.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. 2. ed. Lavras: UFLA, 2006. 729 p.

NOGUEIRA, M. A. et al. **Coinoculação da soja com *Bradyrhizobium* e *Azospirillum* na safra 2017/2018 no Paraná: nodulação e produtividade**. Londrina: Embrapa Soja, 2018. 37 p. (Circular Técnica, 190).

O'CALLAGHAN, M.; BALLARD, R. A.; WRIGHT, D. Soil microbial inoculants for sustainable agriculture: Limitations and opportunities. **Soil Use and Management**, v. 38, n. 3, p. 1340–1369, 1 jul. 2022.

OROZCO-MOSQUEDA, M. DEL C. et al. Plant growth-promoting bacteria as bioinoculants: Attributes and challenges for sustainable crop improvement. **agronomy** MDPI AG, , 1 jun. 2021.

PEREIRA, S. I. A. et al. Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) improve the growth and nutrient use efficiency in maize (*Zea mays* L.) under water deficit conditions. **Heliyon**, v. 6, n. 10, 1 out. 2020.

PRANDO, A. M. et al. Coinoculação da soja com *Bradyrhizobium* e *Azospirillum* na safra 2019/2020 no Paraná. **Circular Técnica 166**, p. 1–22, nov. 2020.

RIVERA, D. et al. New insights into indole-3-acetic acid metabolism in *Azospirillum brasilense*. **Journal of Applied Microbiology**, v. 125, n. 6, p. 1774–1785, 1 dez. 2018.

RONDINA, A. B. L. et al. Changes in root morphological traits in soybean co-inoculated with *Bradyrhizobium* spp. and *Azospirillum brasilense* or treated with *A. brasilense* exudates. **Biology and Fertility of Soils**, v. 56, n. 4, p. 537–549, 1 maio 2020.

RÖSKE, V. M. et al. Inoculation and co-inoculation of *Bradyrhizobium japonicum* and *Azospirillum brasilense* in soybean crop with the use of soil bio-activator. **Communications in Plant Sciences**, v. 12, n. 2022, p. 24–32, 2022.

SAEID, A.; PROCHOWNIK, E.; DOBROWOLSKA-IWANIEK, J. Phosphorus solubilization by *Bacillus* species. **Molecules**, v. 23, n. 11, 6 nov. 2018.

SILVA, A. H. DE S.; VAZ, E. P.; SANTANA, G. DE G. AVANÇOS E DESAFIOS NA PRODUÇÃO DE SEMENTES DE SOJA. **Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro**, v. 12, p. 1–14, 2024.

SINGH, P. et al. Unlocking the strength of plant growth promoting *Pseudomonas* in improving crop productivity in normal and challenging environments: a review. **Journal of Plant Interactions**, v. 17, n. 1, p. 220–238, 2022.

SINGH, P. et al. Whole Genome Analysis of Sugarcane Root-Associated Endophyte *Pseudomonas aeruginosa* B18—A Plant Growth-Promoting Bacterium With Antagonistic Potential Against *Sporisorium scitamineum*. **Frontiers in Microbiology**, v. 12, 5 fev. 2021.

SOLANKI, A. C.; GURJAR, N. S.; SHARMA, S. Co-Inoculation of Non-Symbiotic Bacteria *Bacillus* and *Paraburkholderia* Can Improve the Soybean Yield, Nutrient Uptake, and Soil Parameters. **Molecular Biotechnology**, n. 0123456789, 2023.

SPHERICAL INSIGHTS. **Global Agricultural Inoculants Market Size, Share, Forecasts to 2033**. 2024. Disponível em: <https://www.sphericalinsights.com/pt/reports/agricultural-inoculants-market>. Acesso em: 10 mar. 2025.

SUGIYAMA, A. The soybean rhizosphere: Metabolites, microbes, and beyond—A review. **Journal of Advanced Research**, v. 19, p. 67–73, set. 2019.

SUSS, A. **Características biométricas, produtivas e fisiológicas da soja submetida a inoculação e co-inoculação com *Bradyrhizobium japonicum* e *Azospirillum brasilense***. 2020. 69 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Marechal Cândido Rondon, 2020.

TAIZ, L. et al. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal Diversidade vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 2017. v. 6 ed.

VACHERON, J. et al. Plant growth-promoting rhizobacteria and root system functioning. **Frontiers in Plant Science**, v. 4, n. SEP, 17 set. 2013.

VEY, R. T. et al. Phosphate solubilization capacity by bacteria in soybean crops. **Brazilian Journal of Biology**, v. 85, 2025.

ZHENG, Y. et al. Elevated CO₂ concentration induces photosynthetic down-regulation with changes in leaf structure, non-structural carbohydrates and nitrogen content of soybean. **BMC Plant Biology**, v. 19, n. 1, 13 jun. 2019.

5. CAPÍTULO 2: RESPOSTAS DA SOJA À COINOCULAÇÃO COM *AZOSPIRILLUM BRASILENSE*, ASSOCIADAS À APLICAÇÃO FOLIAR DE BIOESTIMULANTES.

Resumo: A soja (*Glycine max* [L.] Merrill) representa cultura de ampla importância para o agronegócio brasileiro, com protagonismo na geração de proteína vegetal e óleo. Para atender à crescente demanda global por produtividade com sustentabilidade, estratégias biológicas têm sido incorporadas visando otimizar o metabolismo das plantas. Entre essas alternativas, destaca-se a associação bactérias promotoras de crescimento vegetal (BPCV) e bioestimulantes. Este estudo teve como objetivo avaliar o desempenho morfofisiológico e produtivo da soja em resposta à coinoculação de *Bradyrhizobium japonicum* com *Azospirillum brasilense*, associada à aplicação foliar de três tipos de bioestimulantes: regulador vegetal (RV), estruturador vegetal à base de silício (EV) e bioestimulante à base de aminoácido (BA). O experimento foi conduzido em ambiente protegido com a cultivar M5947 IPRO, em delineamento em blocos casualizados, com oito tratamentos, sendo: T1- inoculação com *B. japonicum* (SEMIA 5079); T2- *B. japonicum* (SEMIA 5079) + *A. brasilense* (Abv5/Abv6); T3- *B. japonicum* (SEMIA 5079) + RV; T4- *B. japonicum* (SEMIA 5079) + EV; T5- *B. japonicum* (SEMIA 5079) + BA; T6- *B. japonicum* (SEMIA 5079) + *A. brasilense* (Abv5/Abv6)+ RV; T7- *B. japonicum* (SEMIA 5079) + *A. brasilense* (Abv5/Abv6) + EV e T8- *B. japonicum* (SEMIA 5079) + *A. brasilense* (Abv5/Abv6) + BA. As variáveis analisadas incluíram altura de planta, diâmetro do caule, área foliar, massa seca de folhas, caule, raiz e total, índice SPAD e índices de trocas gasosas (taxa de assimilação de CO₂, condutância estomática, transpiração, concentração interna de CO₂, razão *Ca/Ci*, eficiência do uso da água e eficiência de carboxilação), além dos componentes da produção (número de vagens por planta, número de grãos por vagem, número total de grãos por planta e massa de grãos por planta). Os resultados demonstraram que a combinação entre *A. brasilense* e regulador vegetal promoveu aumentos expressivos em área foliar, massa seca total e parâmetros de eficiência fotossintética. A aplicação do estruturador vegetal (EV) contribuiu para maior densidade radicular e estabilidade fisiológica, enquanto o bioestimulante aminoácido favoreceu maior densidade foliar e acúmulo de biomassa nas folhas. No entanto, as alterações fisiológicas e morfoestruturais promovidas pelos tratamentos não resultaram em incrementos significativos nos componentes da produção. As análises indicam que a integração de BPCV com bioestimulantes foliares influencia positivamente variáveis relacionadas ao crescimento vegetativo e ao metabolismo da soja, ainda que os reflexos sobre o rendimento final não tenham sido expressivos nas condições do experimento. A combinação de vias distintas de aplicação de bioinsumos demonstra potencial para contribuir com sistemas de produção mais eficientes, especialmente em fases vegetativas da cultura.

Palavras-Chaves: *Glycine max* L.; FBN; PGPR; bioinsumos

5.1. INTRODUÇÃO

O papel estratégico da soja (*Glycine max*) no sistema agroalimentar brasileiro e mundial está fortemente associado ao seu perfil nutricional, caracterizado por altos teores de proteínas, lipídios, carboidratos e compostos bioativos, como as isoflavonas, além de minerais essenciais (CARCIOCHI et al., 2019). Esse valor nutricional consolida sua presença tanto na alimentação básica, através de carnes, leites e óleos comestíveis, quanto na indústria de alimentos ultraprocessados, compondo uma ampla gama de produtos como biscoitos, massas e sobremesas (CAMPOS, 2023). A tendência de crescimento do consumo interno, projetado para atingir 69,8 milhões de toneladas até 2033/2034, reforça a necessidade de estratégias produtivas cada vez mais eficientes e sustentáveis (MAPA, 2024).

Nesse contexto, a fixação biológica de nitrogênio (FBN) emerge como uma prática central no manejo da cultura, promovida predominantemente pela inoculação com *Bradyrhizobium japonicum*, capaz de atender até 94% da demanda de nitrogênio da planta (Hungria; Nogueira, 2019). Esse processo, mediado pela nitrogenase, complexo enzimático que possibilita a conversão do nitrogênio atmosférico em formas assimiláveis (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006), representa não apenas uma alternativa para reduzir o uso de fertilizantes sintéticos, mas também um componente chave na estruturação de sistemas integrados, que associam a FBN a outras tecnologias, como a coinoculação e o uso de bioestimulantes, para ampliar a eficiência metabólica e a sustentabilidade da produção.

O crescimento e o desenvolvimento da soja resultam da interação dinâmica entre a parte aérea e o sistema radicular, constituindo uma unidade fisiológica integrada capaz de ajustar-se continuamente às condições ambientais. Essa conexão é mediada por fluxos bidirecionais de sinais hormonais, elétricos e metabólicos que, ao trafegarem pelo sistema vascular, garantem a coordenação funcional entre captação de recursos acima do solo e absorção de água e nutrientes na rizosfera (SHABALA et al., 2016; TAIZ et al., 2017; CHEN et al., 2024).

Nesse contexto, a inoculação de *Bradyrhizobium japonicum* e a coinoculação com *Azospirillum brasilense* têm sido amplamente empregadas como estratégias sustentáveis para otimizar a eficiência fisiológica e produtiva da soja. Enquanto *B. japonicum* é essencial para a FBN, levando a redução da dependência de fertilizantes nitrogenados, *A. brasilense* atua principalmente na promoção do crescimento radicular, estimulando o desenvolvimento de raízes

laterais por meio da produção de fitohormônios, como auxinas, e da síntese de ACC-desaminase, que atenua o estresse oxidativo (GUIMARÃES et al., 2018; RONDINA et al., 2020).

A interação entre esses microrganismos e a planta não se limita ao ambiente radicular. Alterações na rizosfera, como a colonização por essas bactérias, desencadeiam respostas metabólicas na parte aérea, afetando processos como a fotossíntese, a abertura estomática e a redistribuição de fotoassimilados (BASTÍAS et al., 2022). De forma recíproca, estímulos originados na parte aérea, incluindo a aplicação de bioestimulantes foliares, podem modular significativamente a morfologia e funcionalidade do sistema radicular (GUO et al., 2023), ajustando a absorção de nutrientes e a interação com a microbiota benéfica associada.

Nesse sentido, destaca-se a crescente adoção de bioestimulantes aplicados via foliar, compostos predominantemente por reguladores vegetais, aminoácidos e nutrientes não essenciais, que visam potencializar a eficiência metabólica das plantas e sua resiliência a estresses abióticos. No Brasil, esse mercado movimentou US\$ 306,6 milhões em 2024, com expectativa de alcançar US\$ 520,09 milhões até 2029, refletindo uma taxa anual de crescimento de 11,15% (PURALEWSKI, 2024). Tal expansão decorre da busca por soluções que promovam maior produtividade com menor impacto ambiental, alinhando-se às tendências globais de sustentabilidade, cujo mercado mundial de bioestimulantes atingiu US\$ 2,974 bilhões em 2023, com projeção de US\$ 9,623 bilhões até 2032 (FORTUNE BUSINESS INSIGHTS, 2024).

Adicionalmente, observa-se que a comunicação entre parte aérea e raiz, mediada por sinais moleculares como RNAs mensageiros, proteínas e açúcares, é essencial para a adaptação da planta frente a condições variáveis. Esse caráter sistêmico confere à aplicação combinada de inoculantes e bioestimulantes um potencial elevado para induzir respostas fisiológicas e morfológicas, promovendo, assim, maior eficiência no uso de nutrientes e resiliência da cultura (SHABALA et al., 2016; OHKUBO et al., 2017; SCHULZE et al., 2019).

Diante desse contexto, parte-se da hipótese de que as combinações da inoculação e coinoculação com a aplicação foliar de bioestimulantes são sinérgicos no crescimento e nas trocas gasosas da soja. Assim, o objetivo deste estudo consistiu em avaliar o comportamento da inoculação com *B. japonicum* e coinoculação com *A. brasilense*, associadas à aplicação foliar de bioestimulantes, sobre a biometria e as trocas gasosas da soja, visando aprofundar a compreensão sobre os efeitos combinados dessas práticas no manejo sustentável da cultura.

5.2. MATERIAIS E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em casa de vegetação localizada na Estação Experimental de Cultivo Protegido e Controle Biológico Prof. Dr. Mário Cesar Lopes, no município de Marechal Cândido Rondon, Paraná, pertencente à Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Unioeste). Segundo a classificação climática de Köppen (KÖPPEN BRASIL, 2024), a região possui clima subtropical úmido mesotérmico (Cfa), caracterizado por temperatura média anual de 21,1 °C e precipitação média anual de 1.726 mm.

A semeadura foi realizada em 7 de janeiro de 2025, utilizando sementes de soja da variedade M5947, usada no experimento, pertencente ao grupo de maturação 5,9 com tipo de crescimento indeterminado e porte médio. Com resistência ao cancro da haste, à pústula bacteriana, a *macrophomina* e moderadamente sensível à podridão radicular causada por *Phytophthora*. Possui o peso médio de mil sementes de 143g gramas. Sendo cultivado duas plantas em vasos de oito litros, preenchidos com solo classificado como Latossolo Vermelho eutroférico de textura muito argilosa. Amostras desse solo foram encaminhadas ao Laboratório de Química Agrícola da Unioeste para análises químicas e físicas, cujos resultados estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7. Características químicas do solo coletado na camada de 0–20 cm, utilizado para o enchimento dos vasos. Marechal Cândido Rondon, 2025.

pH	V	P	MO	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Al ³⁺	H+Al	SB	CTC
CaCl ₂	-%-	mg dm ⁻³	g dm ⁻³	----- cmol _c dm ⁻³ -----						
4,63	37ip	1,16	3,36	1,81	0,56	0,06	0,37	4,18	2,43	6,61
Fe			Mn		Cu			Zn		
----- mg dm ⁻³ -----										
54,24			10,25		4,91			1,11		

(P,K, Micronutrientes) Extrator Mehlich-1;(Al, Ca, Mg) Extrator KCl 1 mol L⁻¹; (H+Al) pH SMP (7,5); Matéria orgânica: método Walkley e Black. Análise realizada no laboratório de química agrícola da universidade estadual do oeste do paraná em Marechal Candido Rondon, PR. Fonte: Autores.

Os vasos foram adubados com NPK formulado 02-20-18, na dose equivalente a 300 kgha⁻¹, incorporado ao solo com o auxílio de uma betoneira, na qual a mistura foi realizada por 5 minutos para garantir a homogeneização.

O experimento seguiu um delineamento em blocos casualizados, com quatro repetições em duplicata, totalizando 64 vasos. Foram estabelecidos oito tratamentos, incluindo um controle

inoculado apenas com *Bradyrhizobium japonicum* e sem aplicação foliar, além de sete variações combinando coinoculação com *Azospirillum brasilense*, via semente, e/ou aplicação foliar de regulador vegetal (RV), estruturador vegetal à base de silício (EV) e bioestimulante à base aminoácidos (BA) em V4. Para as aplicações foliares usou-se pulverizador manual tipo gatilho de 500ml. Os tratamentos foram: T1- inoculação com *B. japonicum* (SEMIA 5079); T2- *B. japonicum* (SEMIA 5079) + *A. brasilense* (Abv5/Abv6); T3- *B. japonicum* (SEMIA 5079) + RV; T4- *B. japonicum* (SEMIA 5079) + EV; T5- *B. japonicum* (SEMIA 5079) + BA; T6- *B. japonicum* (SEMIA 5079) + *A. brasilense* (Abv5/Abv6)+ RV; T7- *B. japonicum* (SEMIA 5079) + *A. brasilense* (Abv5/Abv6) + EV e T8- *B. japonicum* (SEMIA 5079) + *A. brasilense* (Abv5/Abv6) + BA.

Para controle fitossanitário, usou-se pulverizador de compreensão manual com reservatório pressurizável de 1L, foram realizadas aplicações nos estádios fenológicos V4, R1 e R3 da soja. O fungicida à base de piraclostrobina (260 g/L) + epoxiconazol (160 g/L) foi aplicado em R1 e R3. Os inseticidas consistiram em acefato (970 g/kg) utilizado em V4 e dinotefuram (84 g/L) + lambda-cialotrina (48 g/L) em R1 e R3. O controle de plantas daninhas nos vasos foi realizado por remoção manual, eliminando-se as à medida que emergiam, sem a utilização de herbicidas ou ferramentas adicionais.

A irrigação foi realizada por aspersão, com três aplicações diárias programadas para os horários: 7h, 15h e 00h, com duração de 15 minutos por ciclo. O controle térmico foi realizado por sistema automatizado composto por exaustor e painel evaporativo, regulado por controlador digital modelo MT-530E Super (Full Gauge®). Ambos era acionado automaticamente quando a temperatura interna atingia 29 °C e desligado ao retornar para 27 °C.

As avaliações foram realizadas em diferentes estádios fenológicos da cultura. O teor relativo de clorofila foi determinado com o equipamento SPAD (502-Plus Konica Minolta), sendo as medições conduzidas nos estádios V4, R2 e R5. A primeira leitura (V4) ocorreu 48 horas após a aplicação dos tratamentos. Foi feito a média de quatro folhas aleatórias totalmente expandidas, localizadas no terço médio da planta, livres de sintomas de ataque de pragas, doenças e de deficiências nutricionais. No estádio R3, uma das duplicatas foram usadas para obtenção das variáveis biométricas. A altura das plantas foi aferida utilizando uma régua graduada (1:100 cm), considerando a distância do coleto até o ápice. O diâmetro do caule foi medido com um paquímetro digital. As plantas foram seccionadas, separando parte aérea e raiz. A raiz foi destinada à

determinação do volume radicular, enquanto a parte aérea foi transportada para o Laboratório de Fisiologia e Promoção de Crescimento de Plantas (LAFIP). Sendo realizada a contagem das flores remanescentes considerando aquelas em coloração roxeada ou branca do órgão, e contagem das vagens que formaram, ambas diretamente na planta. A área foliar foi determinada por meio do equipamento Area Meter (LI-3100C), sendo os valores utilizados para cálculos conforme as fórmulas descritas na Tabela 8.

Tabela 8. Fórmulas utilizadas para o cálculo de variáveis morfofisiológicas e estruturais em soja cultivada em vasos, Marechal Cândido Rondon, 2025

Relação altura por número de galhos (RANG)	$\frac{\text{Altura}}{\text{Número de galhos}}$
Relação área foliar por número de galhos (RAFNG)	$\frac{\text{Área foliar}}{\text{Número de galhos}}$
Densidade radicular DR	$\frac{\text{Volume radicular}}{\text{Altura}}$
Taxa de formação de vagens TFV_R3	$\left(\frac{\text{N}^\circ \text{ de vagens em R3}}{\text{N}^\circ \text{ de flores em R3} + \text{N}^\circ \text{ de vagens em R3}} \right) \times 100$
Índice de eficiência fotossintética (V4, R2 e R5)	$\text{Índice SPAD} \times \text{Área foliar}$

As raízes seccionadas que foram destinadas à obtenção do volume radicular. Sendo previamente lavadas em água corrente foram imersas em um balde volumétrico de 10 L contendo um volume conhecido de água. A variação no deslocamento do líquido foi registrada e utilizada para cálculos como apresentado na tabela 9.

As folhas, caule e raízes foram acondicionados separadamente em papel Kraft devidamente identificados e foram levados ao laboratório de Máquinas Agrícolas, Tratores e Motores (LAMA) para secagem em estufa de circulação forçada de ar a 65 °C por 72 horas. Ao término da secagem, cada fração da planta foi pesada em balança de precisão (modelo FA2104N – Celtac), com capacidade de 210 g e resolução de 0,0001 g, obtendo assim massa seca das folhas (MSF), massa seca radicular (MSR) e massa seca do caule + pecíolo (MSC), e os valores obtidos foram empregados nos cálculos apresentados na Tabela 9.

Tabela 9. Fórmulas utilizadas para o cálculo de variáveis morfométricas e fisiológicas da soja cultivada em vasos. Marechal Cândido Rondon, 2025

Relação raiz por parte aérea	$\frac{\text{Massa seca radicular}}{\text{Massa seca da parte aérea}}$
Eficiência radicular	$\frac{\text{Volume radicular}}{\text{Massa seca radicular}}$
Densidade foliar	$\frac{\text{Massa seca foliar}}{\text{Área foliar}}$
Massa seca parte aérea	$\text{Massa seca foliar} + \text{massa seca do coleto}$

No estágio R5, foram realizadas medições de trocas gasosas utilizando o medidor portátil Li-6400XT (IRGA) entre 9h e 11h da manhã, sob condição de céu completamente limpo, ausência de nuvens e luminosidade plena. O equipamento foi configurado com intensidade de feixe de luz de $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de radiação fotossinteticamente ativa (PAR). Durante as análises, foram adquiridos dados sobre A - taxa de assimilação líquida de CO_2 ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), E - taxa de transpiração ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), g_s - condutância estomática ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), C_i - concentração interna de CO_2 ($\mu\text{mol mol}^{-1}$), C_a/C_i - razão entre concentração externa e interna de CO_2 ($\mu\text{mol mol}^{-1}$) e CT - Temperatura da folha ($^{\circ}\text{C}$). A EUA - eficiência do uso da água foi calculada por A/E , a $iEUA$ - eficiência intrínseca do uso da água por A/g_s e a fC - eficiência instantânea de carboxilação por A/C_i .

A colheita foi realizada manualmente ao atingir a maturidade fisiológica da soja. Inicialmente, as plantas foram seccionadas, separando a parte aérea das raízes. Em seguida, foi contabilizado o número de vagens por planta. Após a contagem, as vagens foram removidas manualmente e acondicionadas separadamente em papel kraft. Posteriormente, foram submetidas à secagem em estufa de circulação forçada de ar a 60°C por 48 horas. Após esse período, as vagens foram debulhadas manualmente com auxílio de peneiras para separação dos grãos. A massa total de grãos por planta foi determinada pela pesagem do material obtido. Em seguida, foi calculada a massa de 1000 grãos utilizando um contador manual de grãos e realizada a pesagem. Com esses valores, foi estimada a produtividade em g por planta. Os cálculos referentes à taxa de conversão de flores em vagens e outras métricas pertinentes estão apresentados na tabela 10.

Tabela 10. Fórmulas utilizadas para o cálculo das taxas de conversão floral e persistência de vagens em soja cultivadas em vaso. Marechal Cândido Rondon, 2025

Taxa de persistência de vagens (TPV)	$\left(\frac{N^{\circ} \text{ vagens colheita}}{N^{\circ} \text{ vagens em R3}} \right) \times 100$
--------------------------------------	--

Os dados referentes às variáveis fisiológicas, biométricas e reprodutivas foram submetidos à análise de variância (ANOVA), após verificação da normalidade dos resíduos pelo teste de Shapiro-Wilk e da homogeneidade das variâncias. As médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, utilizando o software SISVAR versão 5.8, build 92 (FERREIRA 2000).

5.3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O tratamento T1 apresentou área foliar estatisticamente semelhante à maioria dos tratamentos, sendo superado apenas por T4 e T6. Quanto à biomassa, foi inferior a T5 em MSF, a T7 em MSR e a T6 em MSC e MSPA. Esse desempenho indica que, na ausência de aplicações com bioestimulantes e coinoculação, a planta manteve sua atividade fisiológica sustentada por mecanismos básicos. Segundo Taiz et al. (2017), em ambientes com adequada disponibilidade de nutrientes e sem ocorrência de estresses, o crescimento vegetal é conduzido majoritariamente por reações metabólicas primárias, como fotossíntese, respiração e absorção de água e nutrientes. Nessas condições, não há intensa mobilização de reservas ou redirecionamento de assimilados, o que explica a estabilidade funcional observada em T1. Complementarmente, Fagan e Reis (2019) descrevem o período vegetativo como a fase de construção da “caixa de produção”, etapa em que a planta investe na formação de folhas e hastes, buscando otimizar a interceptação de luz e a estruturação do aparato fotossintético, conforme mostrado na Tabela 11.

Ainda na tabela 11 verifica-se que os tratamentos como T2 e T3 apresentaram comportamento semelhante, com área foliar comparável aos demais, mas sem ganhos expressivos em biomassa. T2 recebeu coinoculação com *A. brasilense*, enquanto T3 foi submetido à aplicação do regulador vegetal. As variáveis MSF, MSR, MSC e MSPA de ambos foram inferiores às dos tratamentos em destaque. A atuação do *Azospirillum* está relacionada à produção de fitormônios, especialmente o ácido indolacético (AIA), que estimula raízes laterais e favorece a absorção de

nutrientes (HUNGRIA; NOGUEIRA, 2019). Já o regulador vegetal atua por meio de estímulo hormonal exógeno, regulando divisão celular e expansão de tecidos. Entretanto, Ecco et al. (2019) destacam que aplicações foliares contendo citocinina, auxina e giberelina favorecem o crescimento vegetativo, como altura de plantas e diâmetro de caule, sendo resultados dependentes da dose e do manejo adotado. No presente estudo, não foram observadas diferenças significativas nessas variáveis morfológicas entre os tratamentos, o que sugere que os efeitos dos bioestimulantes foliares ficaram restritos às variáveis de área foliar e biomassa, sem alterações perceptíveis no porte das plantas.

Tabela 11. Características morfométricas da parte aérea e do sistema radicular de soja variedade M5947, em R3, cultivado em vaso, submetidas à coinoculação com *A. brasilense* e à aplicação foliar de bioestimulantes: Altura (ALT), diâmetro do caule (D), área foliar (AF), volume radicular (VR), número de galhos (NG), massa seca foliar (MSF), massa seca radicular (MSR), massa seca do caule (MSC), massa seca da parte aérea (MSPA), Marechal Cândido Rondon, PR, 2025.

TRAT	ALT (cm)	D (mm)	AF (cm ²)	VR (cm ³)	NG	MSF (g)	MSR (g)	MSC (g)	MSPA (g)
T1	44,9	7,0	937,9 b	92,5	5,2	4,2 bc	5,8 bc	7,2 ab	11,39 ab
T2	45,3	7,3	1144,7 ab	87,5	5,1	3,4 cd	3,6 c	4,1 b	7,58 b
T3	47,2	8,0	834,9 b	97,5	4,4	3,2 cd	3,9 c	5,4 b	8,70 b
T4	46,8	7,2	1440,8 a	141,2	4,7	2,5 d	6,5 bc	6,2 ab	8,69 b
T5	48,8	7,3	1045,8 ab	117,5	4,6	6,0 a	8,5 b	5,2 b	11,16 ab
T6	47,2	6,8	1483,8 a	130,0	4,9	5,3 ab	4,5 c	9,7 a	15,00 a
T7	48,7	7,2	1081,6 ab	115,0	4,4	3,7 cd	13,5 a	6,2 ab	9,98 b
T8	47,3	7,7	824,8 b	90,0	4,2	2,7 cd	3,4 c	4,8 b	7,55 b
CV	3,9	22,17	17,33	30,5	24,8	16,3	25,9	25,3	18,21

Letras minúsculas iguais na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. T1- inoculação com *B. japonicum* (SEMIA 5079); T2- *B. japonicum* (SEMIA 5079) + *A. brasilense* (Abv5/Abv6); T3- *B. japonicum* (SEMIA 5079) + RV; T4- *B. japonicum* (SEMIA 5079) + EV; T5- *B. japonicum* (SEMIA 5079) + BA; T6- *B. japonicum* (SEMIA 5079) + *A. brasilense* (Abv5/Abv6)+ RV; T7- *B. japonicum* (SEMIA 5079) + *A. brasilense* (Abv5/Abv6) + EV e T8- *B. japonicum* (SEMIA 5079) + *A. brasilense* (Abv5/Abv6) + BA.

Em contraste, T6 apresentou os maiores valores para AF, MSF, MSC e MSPA, resultado atribuído à sinergia entre regulador vegetal e coinoculação com *Azospirillum*. Essa interação amplificou os estímulos hormonais endógenos e exógenos, promovendo divisão celular e crescimento foliar. Os reguladores vegetais contribuem a nível celular contribuindo para o desenvolvimento radicular e também para atividades antioxidantes (FAROOQ et al, 2016; BULEGON et al., 2019). O efeito conjunto favoreceu o desenvolvimento vegetativo completo, com alocação eficiente de assimilados na parte aérea e em estruturas produtivas.

Os tratamentos T4 e T7, ambos com aplicação foliar de silício, evidenciaram comportamentos distintos, conforme demonstrado na tabela 11. T4 apresentou a maior AF e em MSC, enquanto T7, embora com AF inferior, foi superior em MSR e semelhante em MSC. Essa diferença sugere que a coinoculação com *Azospirillum* em T7 redirecionou assimilados para o sistema radicular, promovendo ganho em biomassa. Segundo Fagan et al. (2015), esse tipo de resposta reflete a ativação de rotas hormonais específicas. Bisht e Chhabra (2024) complementam que compostos bioativos modulam tanto o metabolismo primário quanto o secundário, promovendo aumento de área foliar com impacto variável na produção de biomassa. Em T4, a aplicação de silício e ausência da coinoculação também promoveu maior volume radicular, ainda que sem significância estatística, sugerindo estímulos à arquitetura das raízes. Guerriero, Hausman e Legay (2016) e Luyckx et al. (2017) explicam que o silício reforça a parede celular e promove estabilidade fisiológica, mesmo sem ser translocado até as raízes. Em T7, essa mesma combinação resultou na maior MSR entre os tratamentos, resultado possivelmente ligado à ação conjunta entre a estabilidade promovida pelo silício e o estímulo hormonal do *Azospirillum* (TRIPATHI et al., 2021).

T5 e T8, ambos com aplicação foliar de aminoácidos, de acordo com a tabela 11, apresentaram respostas contrastantes. T5 destacou-se em MSF e MSPA, em decorrência de aminoácidos como glicina e prolina que contribuem para funções osmóticas e assimilação de nitrogênio (TAIZ et al., 2017; AMOANIMAA-DEDE et al., 2022). Teixeira et al. (2020) observaram que a aplicação de glutamato aumentou a massa seca da parte aérea da soja mesmo sob condições hídricas normais. Bisht e Chhabra (2024) também ressaltam que a eficácia da aplicação foliar depende da fase fisiológica da planta, sendo mais efetiva em momentos de alta atividade metabólica, condição condizente com o estágio V4 utilizado no presente estudo. Já T8, que combinou aminoácidos com coinoculação de *Azospirillum*, apresentou desempenho inferior em praticamente todas as variáveis, o que indica incompatibilidade entre os estímulos ou competição por rotas metabólicas, comprometendo a expressão fisiológica esperada.

A partir dos dados morfológicos obtidos, foram calculadas variáveis secundárias como razão altura/número de galhos e eficiência radicular. Os resultados estão apresentados na Tabela 12. Os tratamentos T5 e T8 apresentaram respostas contrastantes, embora ambos tenham recebido aminoácidos por via foliar. T5 destacou-se com o maior valor de DF do estudo, sugerindo incremento na espessura foliar e potencial fotossintético, o que refletiu em maior acúmulo de

biomassa nas folhas, conforme observado nos teores de MSF. Essa resposta está associada à ação de aminoácidos como glicina e prolina, que atuam como osmoprotetores e precursores de proteínas estruturais (FAGAN; REIS, 2019), além de contribuírem para o reforço de tecidos fotossintéticos. Já T8, que combinou aminoácidos com coinoculação de *Azospirillum brasilense*, apresentou valores inferiores de densidade foliar em comparação com T5. Mas, apresentou-se semelhantes em ER sugerindo equilíbrio ou menor capacidade da soja em acumular massa radicular para cada unidade de densidade. No trabalho de Leite et al. (2023) demonstra que a coinoculação promove o crescimento coordenado entre raiz e parte aérea, com incremento em volume radicular e biomassa de parte aérea. Na condição desse trabalho mostrou-se insuficiente para incrementos em DF, mas contribuiu para o desenvolvimento radicular eficiente.

Tabela 12 - Razões e índices biométricos de plantas de soja variedade M5947, em R3, cultivado em vaso, submetidas à coinoculação com *A. brasilense* e à aplicação foliar de bioestimulantes, RANG: razão altura/número de galhos; RAFNG: razão área foliar/número de galhos; DF: densidade foliar; RPA: razão raiz/parte aérea; ER: eficiência radicular; DR: densidade radicular. Marechal Cândido Rondon, PR, 2025

TRAT	RANG (cm/galho)	RAFNG (cm ² /galho)	DF (g/cm ²)	RPA (g/g)	ER (g/cm ³)	DR (g/cm ³)
T1	8,9	184,2	0,0045 ab	0,5 b	15,9 ab	2,0
T2	9,1	232,2	0,0031 c	0,5 b	24,9 ab	1,9
T3	11,4	203,2	0,0039 abc	0,4 b	26,5 ab	2,1
T4	10,5	329,8	0,0018 c	0,8 b	23,9 ab	3,0
T5	10,7	233,8	0,0061 a	0,8 b	13,9 ab	2,4
T6	10,0	313,9	0,0037 bc	0,3 b	31,0 a	2,8
T7	11,3	249,5	0,0036 bc	1,4 a	8,6 b	2,3
T8	12,5	210,2	0,0035 bc	0,5 b	26,9 ab	1,9
CV	26,2	32,0	25,41	31,7	40,3	28,3

Letras minúsculas iguais na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. T1- inoculação com *B. japonicum* (SEMIA 5079); T2- *B. japonicum* (SEMIA 5079) + *A. brasilense* (Abv5/Abv6); T3- *B. japonicum* (SEMIA 5079) + RV; T4- *B. japonicum* (SEMIA 5079) + EV; T5- *B. japonicum* (SEMIA 5079) + BA; T6- *B. japonicum* (SEMIA 5079) + *A. brasilense* (Abv5/Abv6) + RV; T7- *B. japonicum* (SEMIA 5079) + *A. brasilense* (Abv5/Abv6) + EV e T8- *B. japonicum* (SEMIA 5079) + *A. brasilense* (Abv5/Abv6) + BA.

T4 e T7, ambos submetidos à aplicação foliar de silício, também apresentaram comportamentos distintos. T4 se destacou pela maior área foliar, porém associada à menor DF, indicando expansão de superfície sem incremento proporcional em espessura. Folhas mais densas tem menor capacidade fotossintética por unidade de massa (NIINEMETS, 1999), o que reforça a interpretação de que o silício, nesse caso, atuou mais na dimensão morfológica da lâmina foliar. Guerriero, Hausman e Legay (2016) relatam que o silício promove o reforço da parede celular e

modifica a composição das raízes, o que justifica a maior densidade radicular observada em T4, mesmo sem aumento proporcional da RPA ou ER. Em contraste, T7, que combinou silício com coinoculação, apresentou DF duas vezes superior à de T4, sugerindo ganho proporcional em biomassa foliar além da expansão de área. A ação integrada do silício com microrganismos promotores de crescimento favoreceu o espessamento celular e a maior densidade de tecidos vegetativos, conforme relatado por Sharma et al. (2023). T7 também demonstrou a maior RPA, indicando forte alocação de biomassa ao sistema radicular, embora com a menor ER entre os tratamentos, o que sinalizar que o investimento em estrutura não resultou em desempenho funcional de forma semelhante aos demais tratamentos. Em relação ao controle (T1), T7 expressa uma estratégia de crescimento distinta, priorizando expansão e massa radicular frente a menor densidade funcional, conforme a tabela 12.

T6 apresentou um perfil fisiológico específico, com RPA inferior à de T7, mas ER superior a todos os demais, o que indica a eficiência da massa radicular formada. A combinação da coinoculação com regulador vegetal pode ter estimulado a formação de raízes laterais com elevada atividade metabólica (SANGIOVO et al., 2024). Esse desempenho sugere de que a funcionalidade radicular não está necessariamente associada à maior RPA, mas à qualidade e arquitetura dos tecidos formados. T2 apresentou DF inferior a T6 e semelhante a T3 que teve comportamentos semelhantes em ER e RPA, sugerindo atuação morfofisiológica com efeito funcional moderado. T2 recebeu coinoculação de *Azospirillum*, enquanto T3 recebeu regulador vegetal. As BPCV (LOPES et al., 2021) e reguladores vegetais (FAGAN et al., 2015) modulam a síntese de fitohormônios e ativam rotas fisiológicas que favorecem o desenvolvimento vegetal. A manutenção dos parâmetros morfofisiológicos está relacionada à regulação do AIA e à diferenciação de tecidos radiculares.

Ainda na tabela 12, o controle, T1, apresentou comportamento estável, com ER e DF semelhantes aos demais tratamentos e RPA significativamente inferior apenas a T7. Segundo Fagan e Reis (2019), a fase vegetativa corresponde à formação da “caixa de produção”, momento em que a planta direciona recursos para crescimento foliar e estrutural. Nesse contexto, a estabilidade de T1 sem sinais de estresse ou estímulo adicional, associada à menor RPA, pode indicar priorização da parte aérea frente ao sistema radicular. A ausência de bioestímulos parece não comprometer o desenvolvimento geral da planta sob condições favoráveis, mas limita a manifestação de comportamentos observadas nos demais manejos.

Esse comportamento está diretamente relacionado às respostas fisiológicas observadas nas plantas, especialmente em termos de assimilação de carbono, condutância estomática e eficiência de uso da água. A Tabela 13 apresenta os valores médios das variáveis de trocas gasosas no estágio R5, destacando os efeitos promovidos pelos diferentes tratamentos sobre a fisiologia foliar.

Tabela 13. Trocas gasosas em folhas de soja variedade M5947, em R5, cultivado em vaso, submetidas à coinoculação com *A. brasilense* e à aplicação foliar de bioestimulantes, *A*: taxa assimilatória líquida de CO₂ ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$); *GS*: condutância estomática ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$); *E*: taxa de transpiração ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$); *Ci*: concentração interna de CO₂ ($\mu\text{mol mol}^{-1}$); *Ca/Ci*: razão da concentração ambiente/interna de CO₂; *CT*: Temperatura da folha (°C); *EUA*: eficiência de uso da água ($\mu\text{mol CO}_2 / \text{mmol H}_2\text{O}$); *iEUA*: Eficiência intrínseca do uso da água ($\text{mmol H}_2\text{O} / \mu\text{mol CO}_2$); *fC*: Eficiência instantânea de carboxilação. Marechal Cândido Rondon, PR, 2025

TRAT	<i>A</i>	<i>GS</i>	<i>E</i>	<i>Ci</i>	<i>Ca/Ci</i>	<i>CT</i>	<i>EUA</i>	<i>iEUA</i>	<i>FC</i>
T1	48,66	1,39	9,07	414,13	0,828	28,61	5,39	35,14	0,118
T2	49,70	1,37	8,74	410,94	0,821	28,33	5,68	36,73	0,123
T3	51,29	1,81	9,78	419,16	0,844	28,59	5,29	29,27	0,123
T4	49,99	1,56	9,16	413,10	0,828	28,44	5,61	34,81	0,122
T5	47,62	1,44	9,21	417,34	0,832	28,72	5,17	34,08	0,116
T6	47,20	1,60	9,07	423,95	0,844	28,39	5,22	30,95	0,112
T7	47,85	1,32	8,64	412,25	0,821	28,39	5,61	37,78	0,117
T8	49,09	1,32	8,89	409,18	0,818	28,59	5,61	37,84	0,121
CV	10,46	22,07	6,82	4,07	3,37	1,36	11,39	21,88	13,96

Letras minúsculas iguais na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. T1- inoculação com *B. japonicum* (SEMIA 5079); T2- *B. japonicum* (SEMIA 5079) + *A. brasilense* (Abv5/Abv6); T3- *B. japonicum* (SEMIA 5079) + RV; T4- *B. japonicum* (SEMIA 5079) + EV; T5- *B. japonicum* (SEMIA 5079) + BA; T6- *B. japonicum* (SEMIA 5079) + *A. brasilense* (Abv5/Abv6)+ RV; T7- *B. japonicum* (SEMIA 5079) + *A. brasilense* (Abv5/Abv6) + EV e T8- *B. japonicum* (SEMIA 5079) + *A. brasilense* (Abv5/Abv6) + BA.

A ausência de diferenças estatísticas entre os tratamentos nas variáveis de trocas gasosas indica que no estágio R5, os manejos aplicados em V4 não provocaram alterações significativas nas trocas gasosas da soja. Tagliapietra et al. (2022) destacam que a resposta a bioestimulantes depende do estágio fenológico e da sensibilidade dos tecidos, reforçando que o momento de avaliação pode ter captado um ponto de equilíbrio e não de máxima resposta, conforme demonstrado na tabela 13.

Apesar da homogeneidade estatística, os valores médios permitem observar que T3, por exemplo, obteve o maior valor de *A* e *GS*, indicando elevada capacidade fotossintética e de difusão de CO₂. Esse desempenho está associado à aplicação de reguladores vegetais, que tendem a modular o metabolismo do carbono e a abertura estomática. Já T2, que apresentou o maior valor de *EUA* e manteve boa assimilação de CO₂, destaca-se pela eficiência fisiológica, com menor perda de água por unidade de carbono assimilado. Isso corrobora com Bulegon et al. (2019), que

demonstraram esse comportamento da coinoculação com *A. brasilense* mesmo em condições de estresse hídrico.

Ainda na tabela 13, T4 e T7, ambos com aplicação de silício, também evidenciam estabilidade nas variáveis de trocas gasosas, sugerindo que esse elemento tenha contribuído com a regulação de estruturas associadas ao controle estomático e retenção hídrica. Guerriero, Hausman e Legay (2016) ressaltam que o silício fortalece a parede celular e melhora a integridade da epiderme foliar, o que pode justificar a eficiência observada mesmo sem variação significativa de *A*, *GS* e *E*. O alto valor de *iEUA* nesses dois tratamentos indica uma economia no uso da água que, ainda que discreta, pode ter implicações em fases fenológicas subsequentes.

O tratamento T5, com aplicação de aminoácidos, apresentou valor elevado de *E* e *GS*, com *A* ligeiramente inferior. Esse comportamento está relacionado ao estímulo ao metabolismo secundário e abertura estomática sem aumento proporcional na fixação de carbono. Já T6, com coinoculação e aplicação foliar de RV, mostrou estabilidade fisiológica semelhante a T2 e T3, mas com menor eficiência no uso da água. A combinação dos manejos resultou em redundância de estímulo, sem sinergismo efetivo, sugerindo a necessidade de ajustes na dose ou época de aplicação.

T1 e T8 apresentaram resultados similares, com bom desempenho em variáveis como *A*, *iEUA* e *fC*. No caso de T8, há indicação de que a associação entre coinoculação e aminoácidos manteve a funcionalidade foliar em níveis comparáveis aos demais tratamentos, mesmo sem ganhos expressivos, conforme mostrado na tabela 13. Sangiovo et al. (2024) também reforçam que o equilíbrio metabólico decorrente da ação sinérgica entre *Bradyrhizobium* e *Azospirillum* favorece a translocação de assimilados e a manutenção de um fluxo eficiente entre parte aérea e sistema radicular. Isso se traduz na estabilidade de variáveis como *Ca/Ci* e *fC*, mesmo diante de diferentes estratégias de manejo.

Portanto, a ausência de diferenças estatísticas deve ser interpretada com cautela, pois os dados médios revelam respostas fisiológicas coerentes com os mecanismos conhecidos para cada estímulo aplicado. Os tratamentos atuaram como estabilizadores da funcionalidade foliar, contribuindo para a eficiência fisiológica sob condições não limitantes. A análise conjunta das variáveis indica que, mesmo sem picos de resposta, houve manutenção de um estado funcional elevado, o que é especialmente desejável em sistemas de alta performance e estabilidade produtiva.

Os dados do índice SPAD obtidos nos diferentes estádios fenológicos estão apresentados na Tabela 14. O índice SPAD avaliado no estágio V4 não apresentou diferenças estatísticas entre os tratamentos, resultado condizente com o curto intervalo entre as aplicações e as avaliações. Mas em R5, no entanto, observou-se comportamento diferenciado entre os manejos, especialmente na manutenção dos teores de clorofila.

Tabela 14. Índice SPAD em folhas de soja variedade M5947, cultivado em vaso, submetidas à coinoculação com *A. brasilense* e à aplicação foliar de bioestimulantes, SPADV4: índice SPAD no estágio V4; SPADR2: índice SPAD no estágio R2; SPADR5: índice SPAD no estágio R5. Marechal Cândido Rondon, PR, 2025

TRAT	SPAD _{V4}	SPAD _{R2}	SPAD _{R5}
T1	33,08	33,23	35,00 c
T2	32,13	34,53	37,08 bc
T3	32,27	32,23	39,63 ab
T4	33,67	29,40	38,04 abc
T5	33,84	34,43	40,64 ab
T6	33,15	31,43	41,07 a
T7	32,40	31,68	37,90 abc
T8	32,23	31,75	38,20 abc
CV	5,91	7,61	4,09

Letras minúsculas iguais na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. T1- inoculação com *B. japonicum* (SEMIA 5079); T2- *B. japonicum* (SEMIA 5079) + *A. brasilense* (Abv5/Abv6); T3- *B. japonicum* (SEMIA 5079) + RV; T4- *B. japonicum* (SEMIA 5079) + EV; T5- *B. japonicum* (SEMIA 5079) + BA; T6- *B. japonicum* (SEMIA 5079) + *A. brasilense* (Abv5/Abv6)+ RV; T7- *B. japonicum* (SEMIA 5079) + *A. brasilense* (Abv5/Abv6) + EV e T8- *B. japonicum* (SEMIA 5079) + *A. brasilense* (Abv5/Abv6) + BA.

O tratamento T6 evidenciou os maiores valores de SPAD em R5, com superioridade estatística em relação aos demais tratamentos, conforme mostrado em tabela 14. Tal comportamento indica um possível efeito sinérgico entre a coinoculação com *A. brasilense* e a aplicação de regulador vegetal, favorecendo a síntese, preservação ou retardamento da degradação de clorofila durante o enchimento de grãos. As BPCV sintetizam fitormônios como auxinas, giberelinas e citocininas (LOPES et al., 2021), enquanto os reguladores vegetais contribuem para a integridade das membranas e o retardamento da senescência (FAGAN et al., 2015; CANNON et al., 2025).

Em contraste, o tratamento controle (T1) apresentou teores de SPAD estáveis entre V4 e R2, mas inferioridade estatística em R5. Esse comportamento atribui-se à fixação biológica de nitrogênio promovida por *Bradyrhizobium japonicum* (TAIZ et al., 2017), mas sem estímulos complementares que favoreçam a síntese e manutenção da clorofila em períodos de alta exigência,

como o enchimento de grãos. A ausência de bioestimulantes ou de coinoculação limita o fornecimento de fitormônios e nutrientes, elementos relevantes para a conservação do aparato fotossintético (FAGAN; REIS, 2019).

T3 e T5, embora estatisticamente superiores apenas a T1 em R5, conforme mostrado na tabela 14, apresentaram manutenção dos teores de SPAD ao longo do ciclo. Em T3, esse desempenho está relacionado à aplicação foliar de regulador vegetal, cuja composição contém citocininas que contribui para a preservação da clorofila e o atraso da senescência (FAGAN et al., 2015; TAIZ et al., 2017; CANNON et al., 2025). Já T5, que recebeu aplicação de aminoácidos, demonstrou estabilidade dos teores de SPAD, embora sem diferenças significativas frente aos demais. Essa resposta está associada ao papel dos aminoácidos na proteção da estrutura foliar e na síntese de proteínas, especialmente em fases de maior exigência fisiológica (TAIZ et al., 2017; FAGAN; REIS, 2020).

Os tratamentos T2 e T4 demonstraram desempenho intermediário. T2, com coinoculação, manteve níveis estáveis de SPAD até R5, sendo estatisticamente inferior apenas a T6, conforme demonstrado na tabela 14. O efeito está relacionado à produção de fitormônios pelas BPCV e à maior exploração do solo pelas raízes, favorecendo a nutrição (CASSÁN et al., 2020; LOPES et al., 2021). T4, com aplicação de silício, também apresentou estabilidade ao longo dos estádios. O silício deposita-se nas paredes celulares, promovendo reforço estrutural (GUERRIERO; HAUSMAN; LEGAY, 2016) e reduzindo o estresse oxidativo (CAMPOS et al., 2020). Além disso, sua atuação contribui para o equilíbrio entre carbono e nitrogênio durante o enchimento de grãos (LUYCKX et al., 2017), o que auxiliou na manutenção dos teores de SPAD mesmo sem diferenças estatísticas expressivas.

Ainda na tabela 4, os tratamentos T7 e T8 apresentaram valores de SPAD estatisticamente semelhantes aos demais em todos os estádios. Ainda que não tenham se destacado individualmente, a estabilidade dos valores sugere contribuição dos compostos aplicados. No caso de T7, o silício favoreceu a integridade estrutural, enquanto, provavelmente, a coinoculação contribuiu no equilíbrio hormonal para a preservação da clorofila (CAMPOS et al., 2020; CASSÁN et al., 2020; LOPES et al., 2021). Em T8, os aminoácidos aplicados via foliar, aliados à coinoculação, contribuiu para a manutenção da folha, ainda que sem resposta estatisticamente.

Com base nas variações do índice SPAD entre os estádios fenológicos, foram calculados razões e índices de eficiência fotossintética relativa, de modo a interpretar a resposta dos tratamentos ao longo do ciclo. Os dados estão dispostos na Tabela 15.

O tratamento T6 demonstrou consistência fisiológica ao apresentar os maiores valores de IEFOT nos três estádios avaliados, V4, R2 e R5, bem como razões entre os estádios, refletindo maior manutenção do aparato fotossintético. Tal desempenho atribui-se a ação sinérgica entre o regulador vegetal e a coinoculação com *A. brasilense*, que favoreceu a persistência da estrutura funcional da folha até o enchimento de grãos. As citocininas presentes no regulador vegetal contribuíram com promoção da divisão celular e do retardamento da senescência foliar (CANNON et al., 2025), modulando a síntese de proteínas e enzimas, contribuindo para a manutenção fisiológica, como é definido o modo de ação dos hormônios vegetais (FAGAN et al., 2015). Esses que prolongam a fase juvenil da planta, favorecendo o alongamento celular e estendendo sua longevidade (GUIMARÃES et al., 2018). Segundo Taiz et al. (2017), as citocininas contribuem diretamente para a preservação da síntese de clorofila e proteínas, sendo capazes de atenuar os efeitos da senescência foliar. Além disso, as BPCV sintetizam poliaminas que participam da expansão celular e estimulam a fotossíntese e os processos biossintéticos essenciais ao desempenho vegetal (GUIMARÃES et al., 2018). Lopes et al. (2021) reforçam que essas bactérias promovem o crescimento da área foliar, aumentam o conteúdo de clorofila e intensificam as taxas fotossintéticas, contribuindo para o acúmulo de biomassa.

O tratamento T4 obteve desempenho inferior a T2 na razão R2/V4, mas superior na razão R5/R2, mantendo os valores de IEFOT estáveis ao longo do ciclo, conforme mostrado na tabela 15. Esse comportamento indica preservação estrutural e pigmentária da folha até o final do enchimento. O silício aplicado contribuiu diretamente para essa resposta, promovendo reforço das paredes celulares (GUERRIERO; HAUSMAN; LEGAY, 2016) e arquitetura foliar mais ereta, com melhor interceptação de luz e menor transpiração (CAMPOS et al., 2020). Meena et al. (2014) destacam que o silício favorece o crescimento da área foliar. A estabilidade observada em T4 sugere que a ação estrutural do silício foi suficiente para garantir sustentação da lâmina foliar.

O tratamento controle apresentou aumento no SPAD entre V4 e R2 e manutenção dos níveis até R5, com IEFOT semelhante aos demais em florescimento pleno, mas inferior em V4 e especialmente em R5, comparado a T6, conforme demonstrado na tabela 15. Isso indica menor capacidade, em relação a T6, da planta em manter folhas ativas e pigmentadas durante o

enchimento de grão, reflexo da ausência de estímulos adicionais ao metabolismo ou ao desenvolvimento estrutural. No caso de T3, a aplicação foliar de regulador vegetal também não foi suficiente para superar T4 e T6. Embora contenha citocininas, que retardam a senescência e preservam a síntese de proteínas e clorofila (TAIZ et al., 2017), a aplicação dos bioestimulantes sem a coinoculação parece não ter ativado plenamente as rotas associadas, ou mostrou-se insuficiente para a manutenção funcional da folha (FAGAN et al., 2015) em comparação com T4 e T6.

Tabela 15. Razões do índice SPAD entre estádios fenológicos e índice de eficiência fotossintética relativa em soja variedade M5947, cultivado em vaso, submetida à coinoculação com *A. brasilense* e aplicação foliar de bioestimulantes, R2/V4: razão entre SPAD nos estádios R2 e V4; R5/V4: razão entre R5 e V4; R5/R2: razão entre R5 e R2; IEFOT_{V4}, IEFOT_{R2} e IEFOT_{R5}: índice de eficiência fotossintética relativa nos estádios V4, R2 e R5 respectivamente, Marechal Cândido Rondon, PR, 2025

TRAT	R2/V4	R5/V4	R5/R2	IEFOT _{V4} (cm ²)	IEFOT _{R2} (cm ²)	IEFOT _{R5} (cm ²)
T1	1,01 ab	1,06	1,06 c	30938,7 b	31269,0 ab	32771,8 c
T2	1,08 a	1,16	1,08 bc	36773,5 ab	39577,8 ab	42392,2 abc
T3	0,98 ab	1,24	1,28 ab	26943,8 b	26072,9 b	33105,1 c
T4	0,88 b	1,14	1,31 a	48629,7 a	42960,7 ab	55099,7 ab
T5	1,02 ab	1,21	1,20 abc	35442,5 ab	36088,2 ab	42412,6 abc
T6	0,95 ab	1,25	1,32 a	49028,8 a	46482,3 a	60923,5 a
T7	0,99 ab	1,18	1,20 abc	34805,8 ab	33904,9 ab	41148,2 bc
T8	0,99 ab	1,19	1,21 abc	26689,4 b	26276,1 b	31495,8 c
CV	8,53	7,52	7,42	17,96	20,58	19,24

Letras minúsculas iguais na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. T1- inoculação com *B. japonicum* (SEMIA 5079); T2- *B. japonicum* (SEMIA 5079) + *A. brasilense* (Abv5/Abv6); T3- *B. japonicum* (SEMIA 5079) + RV; T4- *B. japonicum* (SEMIA 5079) + EV; T5- *B. japonicum* (SEMIA 5079) + BA; T6- *B. japonicum* (SEMIA 5079) + *A. brasilense* (Abv5/Abv6)+ RV; T7- *B. japonicum* (SEMIA 5079) + *A. brasilense* (Abv5/Abv6) + EV e T8- *B. japonicum* (SEMIA 5079) + *A. brasilense* (Abv5/Abv6) + BA.

T2 e T7 apresentaram comportamentos semelhantes, conforme tabela 15, com estabilidade nas razões entre estádios e IEFOT. A razão R2/V4 superior em T2 sugere efeito pontual da coinoculação no início do reprodutivo. Lopes et al. (2021) destacam que BPCV favorecem a produção de auxinas, giberelinas, citocininas e poliaminas, as quais promovem a expansão foliar, o acúmulo de clorofila e o aumento das taxas fotossintéticas. Já T7 apresentou IEFOT inferior apenas a T6 em R5, demonstrando relativa preservação estrutural. A associação com o silício favoreceu a integridade da folha (MEENA et al., 2014; CAMPOS et al., 2020), enquanto a coinoculação potencializou vias hormonais e biossintéticas (LOPES et al., 2021). Mesmo sem

sinergia fisiológica plenamente expressa, o comportamento estável de T7 sugere que os estímulos atuaram de forma complementar.

Os tratamentos T5 e T8, ambos com aplicação foliar de aminoácidos, apresentaram comportamentos distintos quanto aos valores de IEFOT. T5, manteve valores estatisticamente semelhantes aos dos demais tratamentos ao longo dos estádios, indicando estabilidade. Esse efeito é decorrente dos aminoácidos que são precursores na síntese de proteínas, e também atuam na regulação osmótica e no armazenamento de nitrogênio (TAIZ et al., 2017). Segundo Calvo, Nelson e Kloepper (2014), essas substâncias também funcionam como sinalizadores metabólicos ou agentes protetores, especialmente sob maior demanda fisiológica, podendo contribuir para a sustentação do aparato fotossintético. Em contraste, T8, que combinou a aplicação de aminoácidos com a coinoculação de BPCV, apresentou os menores valores de IEFOT ao longo do ciclo, se assemelhando ao comportamento do controle e a T3, apesar de manter razões entre estádios semelhantes às dos demais. Ainda que os microrganismos atuem na produção de hormônios vegetais e poliaminas que estimulam a fotossíntese e o crescimento foliar (GUIMARÃES et al., 2018; LOPES et al., 2021), não se observou efeito sinérgico evidente nas condições experimentais condicionadas. Em síntese, os maiores ganhos na preservação da estrutura pigmentada foliar foram observados nos tratamentos que integraram estímulos complementares, como T6 e T4. Por outro lado, manejos isolados ou com baixa integração de mecanismos apresentaram desempenho inferior, conforme demonstrado na tabela 15.

Para avaliar a continuidade e o aproveitamento das estruturas reprodutivas ao longo do ciclo, foram calculadas as taxas de conversão entre os estádios R3 e R8. Os resultados, apresentados na Tabela 16, mostram como os tratamentos influenciaram a formação e o aproveitamento das vagens ao final do ciclo.

O tratamento controle apresentou em TFV estatisticamente semelhante a todos os tratamentos e em NFR superior apenas a T6 e T8. Representando o padrão fisiológico basal sustentado pela fixação biológica de nitrogênio. A conversão de flores em vagens na soja envolve uma complexa interação de estímulos hormonais, estado fisiológico e condições ambientais. Conforme Taiz et al. (2017), a disponibilidade de assimilados combinados com a regulação fitohormonal, estão correlacionados com o desenvolvimento reprodutivo. Fagan et al. (2015) destacam o papel desses reguladores no estímulo ao florescimento e a frutificação em plantas.

Assim, o desempenho de T1 reflete a eficiência fisiológica intrínseca da planta em condições favoráveis, com emissão moderada e conversão funcional compatível com o estágio.

Os tratamentos T2, T5 e T7 apresentaram comportamento estatisticamente semelhante ao T1 em NFR e TFV, refletindo a manutenção das estruturas reprodutivas até R3, conforme a tabela 16. T2, com coinoculação de *A. brasilense*, sustentou emissão floral e taxa de formação de vagens comparáveis ao controle. Conforme Guimarães et al. (2018), a bactéria promove o crescimento vegetal via da síntese de auxinas e citocininas, além da produção de ACC-desaminase, na qual contribuiu estabilidade hormonal e redução de sinais de senescência. Fukami, Cerezini e Hungria (2018) relatam a atuação da espécie sobre a morfogênese radicular e absorção nutricional, na qual corroborou para sustentação nutricional na fase inicial do desenvolvimento das vagens, porém com menor TFV em comparação a T6.

Tabela 16. Conversão reprodutiva da soja variedade M5947, cultivado em vaso, nos estádios R3 e R8 em resposta à coinoculação com *A. brasilense* e à aplicação foliar de bioestimulantes, NFR: número de flores remanescentes no estágio R3; NVF: número de vagens formadas até R8; TFV_{R3}: taxa de flores convertidas em vagens em R3; TPV: taxa de participação das vagens formadas até R3 no total formado em R8, Marechal Cândido Rondon, PR, 2025.

TRAT	NFR	NVF	TFV _{R3} (%)	TPV (%)
T1	13,2 ab	33,5	71,5 abc	46,0
T2	14,5 ab	33,1	69,5 bc	40,0
T3	15,6 a	27,7	64,3 c	41,0
T4	14,8 a	30,2	66,8 c	37,8
T5	12,2 ab	28,3	69,8 bc	30,8
T6	7,0 c	28,5	79,8 a	37,5
T7	13,0 ab	29,5	69,8 bc	41,3
T8	9,4 bc	33,0	77,5 ab	38,3
CV	17,5	15,5	5,79	26,8

Letras minúsculas iguais na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. T1- inoculação com *B. japonicum* (SEMIA 5079); T2- *B. japonicum* (SEMIA 5079) + *A. brasilense* (Abv5/Abv6); T3- *B. japonicum* (SEMIA 5079) + RV; T4- *B. japonicum* (SEMIA 5079) + EV; T5- *B. japonicum* (SEMIA 5079) + BA; T6- *B. japonicum* (SEMIA 5079) + *A. brasilense* (Abv5/Abv6)+ RV; T7- *B. japonicum* (SEMIA 5079) + *A. brasilense* (Abv5/Abv6) + EV e T8- *B. japonicum* (SEMIA 5079) + *A. brasilense* (Abv5/Abv6) + BA.

T5 se manteve funcionalmente equilibrado, com emissão e retenção de flores compatíveis com o padrão fisiológico da cultura, mas com menor proporção de flores convertidas em vagens em R3, em comparação ao T6. Isso sugere que a aplicação de aminoácidos participaram como suporte fisiológico, mas sem a promoção suficiente para formação de vagens em R3 em comparação a T6. Conforme Calvo, Nelson e Kloepper (2014), os aminoácidos, quando aplicado

via foliar, atuam modulando as rotas antioxidantes e fisiológicas, porém, os seus efeitos são menos perceptíveis em condição de ausência de estresses, como é caso no presente experimento. O que refletiu no equilíbrio entre a emissão floração e conversão inicial das vagens da soja, conforme a tabela 16.

A combinação da aplicação foliar de aminoácidos com coinoculação de *A. brasilense*, T8, apresentou TFV estatisticamente semelhante ao T6, com o NFR equilibrados semelhante aos demais, de acordo com a tabela 16. Esse comportamento sugere ação integrada entre os estímulos. Os aminoácidos, aplicados em V4, atuaram como sinalizadores fisiológicos e precursores metabólicos, contribuindo para a manutenção da atividade celular e o equilíbrio osmótico (CALVO, NELSON e KLOEPPER, 2014) durante o início de desenvolvimento das vagens. Em paralelo, o *A. brasilense* contribuiu via produção de fitormônios como auxinas e citocininas, e via favorecimento ao desenvolvimento radicular e a absorção de nutrientes (FUKAMI, CEREZINI e HUNGRIA, 2018; SANTIAGO et al., 2024). A sinergia entre suporte metabólico e regulação hormonal proporcionou estabilidade em R3, sustentando a diferenciação floral e o pegamento inicial de vagens, semelhante ao desempenho observado em T6.

Ainda na tabela 16, T7 apresentou TFV estatisticamente inferiores apenas ao T6, sendo semelhante a todos os demais tratamentos. Para NFR, foram superiores apenas a T6 e semelhantes aos demais. Esse comportamento sugere que, em R3, a combinação entre o silício e a coinoculação foi eficiente para manter a emissão e a diferenciação floral dentro do padrão funcional da cultura. Conforme Sharma et al. (2023) o Si atuou reforçando a parede celular da soja e assim, promoveu a estabilidade metabólica. Os efeitos da aplicação do nutriente se manifestam com maior percepção na presença de fatores estressantes. Em condições favoráveis, como as do presente experimento, seu papel pode se restringir a sustentação, sem percepção estatística nas variáveis reprodutivas como visualizado o comportamento de T6. A coinoculação, por sua vez, contribuiu para manter a emissão e retenção floral dentro da condição experimental acondicionada.

Os tratamentos T6 e T8 apresentaram as maiores TFV e os menores NFR, indicando maior conversão de flores em vagens em R3. Em T6, parte das flores emitidas foram convertida em vagens na fase inicial de formação, conforme mostrado na tabela 16. As auxinas, citocininas e giberelinas, presentes no regulador vegeta, corroboraram com a retenção inicial das flores e a formação inicial das vagens. (TAGLIAPIETRA et al., 2022; CANNON et al., 2025). a presença de *A. brasilense*, via coinoculação, contribuiu com a síntese endógena de hormônios e auxiliando

no crescimento radicular, levando a soja absorver melhor os recursos que necessita (FUKAMI, CEREZINI e HUNGRIA, 2018; SANTIAGO et al., 2024) sugerindo mecanismos de ação simbiótica entre os manejos empregados.

T3 e T4 apresentaram as menores TFV e os maiores NFR na fase inicial de desenvolvimento das vagens em comparação a T6, indicando que, em R3, os bioestimulantes aplicados em V4 não resultaram em maior TFV em comparação a T6, conforme demonstrado na tabela 16. Em T3, o regulador vegetal, como há em sua composição citocinina, auxina e giberelina, contribuiu para a emissão de flores, como mostra em NFR. No entanto, a conversão dessas flores em vagens em R3, contrastando o T6, está de acordo com o modo de ação do RV aplicado com estímulo predominantemente hormonal, sem o envolvimento adicional de fatores fisiológicos integradores como crescimento radicular ou melhoria da absorção nutricional, frequentemente observados em coinoculações. Conforme descrito por Cannon et al. (2023), a efetividade do pegamento está condicionada à sincronia entre estímulo hormonal e estado funcional da planta, o que reforça a natureza específica da resposta observada em T3. T4, com aplicação foliar de silício, apresentou padrão semelhante, com maior número de flores remanescentes e menor taxa de formação de vagens em R3 em comparação a T6. Conforme Guerriero, Hausman e Legay (2016) o silício atuou no fortalecimento morfofisiológico da planta, reforçando a parede celular e assim aumentando a resiliência frente a estresses eminentes. Sendo menos expressivas sobre a quantidade de flores remanescentes ou a formação inicial das vagens em condições fisiológicas não limitantes.

Ainda na tabela 16, o TPV expressa a proporção das vagens que estavam presentes em R3 em relação ao total de vagens contabilizadas na maturidade, sendo um indicativo da contribuição das estruturas formadas no início do enchimento para o conjunto reprodutivo final. No presente experimento, os valores variaram de 30,8% (T5) a 46% (T1), sem diferença estatística entre os tratamentos. Como a cultivar apresenta hábito de crescimento indeterminado, esses valores refletem a dinâmica reprodutiva contínua da planta, na qual estruturas formadas após R3 também compuseram a produtividade final. Dessa forma, o TPV contribui para caracterizar o papel relativo das estruturas reprodutivas iniciais no perfil produtivo total da soja.

Com o objetivo de quantificar a resposta reprodutiva final dos tratamentos, foram avaliadas variáveis produtivas como número total de grãos, massa de mil grãos e produtividade por planta. Os resultados encontram-se dispostos na Tabela 17.

Tabela 17. Componentes de rendimento da soja variedade M5947, cultivado em vaso, em resposta à coinoculação com *A. brasilense* e à aplicação foliar de bioestimulantes, MSV: massa seca da vagem; NTG: número total de grãos; MTG: massa total de grãos; M1000G: massa de mil grãos; Prod: produtividade, Marechal Cândido Rondon, PR, 2025

TRAT	MSV (g)	NTG	MTG (g)	M1000G (g)	Prod (g planta ⁻¹)
T1	25,6	180,3	18,7	127,8	11,5
T2	29,0	206,5	22,0	124,5	11,9
T3	32,6	157,0	25,3	132,5	10,2
T4	29,0	185,0	21,4	131,0	11,9
T5	31,6	215,3	23,6	132,8	13,3
T6	29,0	190,0	21,9	124,8	11,4
T7	27,8	174,5	20,6	125,0	10,9
T8	26,0	205,0	19,2	119,3	11,3
CV	28,9	22,1	30,5	10,4	23,4

Letras minúsculas iguais na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. T1- inoculação com *B. japonicum* (SEMIA 5079); T2- *B. japonicum* (SEMIA 5079) + *A. brasilense* (Abv5/Abv6); T3- *B. japonicum* (SEMIA 5079) + RV; T4- *B. japonicum* (SEMIA 5079) + EV; T5- *B. japonicum* (SEMIA 5079) + BA; T6- *B. japonicum* (SEMIA 5079) + *A. brasilense* (Abv5/Abv6)+ RV; T7- *B. japonicum* (SEMIA 5079) + *A. brasilense* (Abv5/Abv6) + EV e T8- *B. japonicum* (SEMIA 5079) + *A. brasilense* (Abv5/Abv6) + BA.

Os componentes finais de rendimento da soja avaliados neste experimento, como massa seca de vagens, número total de grãos, massa total de grãos, massa de mil grãos e produtividade por planta, não apresentaram diferenças estatísticas entre os tratamentos, conforme mostrado na tabela 17. Isso indica que os estímulos fisiológicos aplicados em V4, incluindo regulador vegetal, silício, bioestimulante aminoácido e coinoculação com *A. brasilense*, não foram suficientes para promover alterações mensuráveis no desempenho reprodutivo da cultura sob as condições do experimento. Ainda que não tenham ocorrido diferenças estatísticas entre os tratamentos, observa-se que os valores de massa de mil grãos ficaram abaixo dos 150 g considerados referência para lavouras de alto rendimento (TAGLIAPIETRA et al., 2022), esse resultado indica que os estímulos aplicados em V4 interferiram no acúmulo de massa nos grãos, porém a capacidade foi limitada por conta do cultivo em vasos.

Nos tratamentos com aplicação foliar de silício, T4 e T7, observa-se comportamento produtivo semelhante, sem incremento significativo nos componentes finais de rendimento, conforme tabela 17. Esses resultados sugerem que o silício corroborou para a manutenção da integridade foliar e o funcionamento fisiológico durante o ciclo da Fabaceae, favorecendo o

desenvolvimento reprodutivo mesmo sem gerar efeito significativo. O silício, mesmo em dicotiledôneas, é absorvido via foliar e promove a estabilidade da parede celular visando garantir equilíbrio metabólico (GUERRIERO et al., 2016; SHARMA et al., 2023).

A auxina, giberelina e citocinina presentes no regulador vegetal corroboraram com a regulação da divisão celular, alongação de tecidos e preservação foliar, promovendo equilíbrio hormonal (FAGAN et al., 2015) da soja ao longo do ciclo. T3, apresentou maior massa de grãos por planta, enquanto T6, em associação com a coinoculação, apresentou maior número total de grãos, conforme tabela 17. Esses resultados, embora não tenham apresentado diferença estatística, sugerem que o estímulo hormonal contribuiu para o comportamento produtivo da soja, influenciando a formação e enchimento dos grãos. A resposta da planta sob aplicação de reguladores vegetais é regulada pela fase fenológica da planta, interação com o ambiente (ECCO et al., 2019; CIPRIANI et al., 2025), e com as bactérias promotoras de crescimento (CASSÁN et al., 2020; LOPES et al., 2021).

Ainda na tabela 17, a aplicação foliar de aminoácidos, T5 e T8 contribuíram para o desempenho reprodutivo da cultura, favorecendo a retenção floral e a formação de vagens. Atuam como precursores metabólicos e sinalizadores fisiológicos, estimulando rotas ligadas a diferenciação reprodutiva, estabilidade fotossintética e mobilização de assimilados (CALVO; NELSON; KLOEPPER, 2014; FAGAN et al., 2015; HENDERSON et al., 2025). Em T5, mostra-se favorecimento ao equilíbrio entre número e massa de grãos. Já em T8, a associação com a coinoculação resultou em maior NTG observado, acompanhado de aumento em MSVT, mas com a menor massa de mil grãos.

O desempenho produtivo observado em T2, T6, T7 e T8, conforme mostrado na tabela 17, está associado a promoção do desenvolvimento radicular e a síntese de fitohormônios, efeitos característicos da coinoculação com *A. brasilense* (CASSÁN; DIAZ-ZORITA, 2016; RONDINA et al., 2020). A interação sinérgica entre as bactérias promotoras de crescimento vegetal e os bioestimulantes aplicados favoreceu a retenção floral e o aproveitamento nutricional. Por outro lado, os desempenhos produtivos em T1, T3, T4 e T5 foram sustentados principalmente pela FBN promovida por *B. japonicum*, cuja contribuição na assimilação e metabolismo de N (HUNGRIA et al., 2015) atendeu à demanda fisiológica da planta no contexto experimental avaliado.

A resposta observada no experimento está relacionada, em parte, as características genéticas da cultivar utilizada. A NS 5959 IPRO, por apresentar hábito de crescimento

indeterminado, com emissão contínua de flores e estruturas reprodutivas, favoreceu respostas a estímulos fisiológicos voltados à retenção floral e ao acúmulo de biomassa. Além disso, seu ciclo precoce demanda rápida eficiência na assimilação de nutrientes e hormônios, o que contribuiu para a resposta apresentada aos tratamentos estudados. A utilização de cultivares com características distintas da empregada neste estudo contribuirá para o entendimento do padrão de resposta que a aplicação foliar de regulador vegetal, silício, aminoácidos e sua associação com a coinoculação proporciona no cultivo da soja.

5.4. CONCLUSÃO

- A coinoculação de *Bradyrhizobium japonicum* com *Azospirillum brasilense* e a aplicação foliar de bioestimulantes influenciaram variáveis biométricas e fisiológicas da soja;
- A associação entre coinoculação com *A. brasilense* e aplicação de regulador vegetal resultou em maior área foliar, massa seca da parte aérea, índice SPAD em R5 e índice de eficiência fotossintética relativa em todos os estádios;
- A aplicação isolada de silício promoveu incremento em área foliar e densidade radicular, com preservação da atividade fotossintética até R5;
- A aplicação isolada de aminoácidos elevou a densidade foliar e a massa seca foliar, favorecendo o acúmulo de biomassa;
- A coinoculação com *A. brasilense* aumentou a eficiência do uso da água e a densidade radicular, mantendo a estabilidade dos teores de clorofila;
- Não houve diferença estatística entre os tratamentos para produtividade por planta, massa de mil grãos e número total de grãos;
- A cultivar de hábito indeterminado influenciou a dinâmica reprodutiva da soja, com emissão contínua de flores e formação de vagens após R3, o que impactou a interpretação dos dados de taxa de formação e persistência de vagens.

5.5. REFERÊNCIAS

- AMOANIMAA-DEDE, H. et al. Growth regulators promote soybean productivity: A review. **PeerJ**, v. 10, 4 mar. 2022.
- BASTÍAS, D. A. et al. Environmental interference of plant–microbe interactions. **Plant Cell and Environment**, v. 45, n. 12, p. 3387–3398, 2022.

BISHT, A.; CHHABRA, R. Biostimulants: paving way towards sustainable agriculture and food security. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, v. 36, n. 2, p. 139–163, 1 jun. 2024.

BULEGON, L. G. et al. Soybean responses to *Azospirillum brasilense* and plant regulators in drought conditions. **Revista Brasileira de Ciencias Agrarias**, v. 14, n. 4, 2019.

CALVO, P.; NELSON, L.; KLOEPPER, J. W. Agricultural uses of plant biostimulants. **Plant and Soil**, v. 383, n. 1–2, p. 3–41, 1 out. 2014.

CAMPOS, Arnaldo de. **O custo da soja para o Brasil: renúncias fiscais, subsídios e isenções da cadeia produtiva**. S.I: Jambo Estúdio, 2023. 46 p.

CAMPOS, C. N. S. et al. Silicon mitigates ammonium toxicity in plants. **Agronomy Journal**, v. 112, n. 2, p. 635–647, 1 mar. 2020.

CANNON, B. et al. Physiological Effects and Economic Impact of Plant Growth Regulator Applications on Soybean. **Agronomy**, v. 15, n. 4, 1 abr. 2025.

CARCIOCHI, W. D. et al. Soybean yield, biological N₂ fixation and seed composition responses to additional inoculation in the United States. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, 1 dez. 2019.

CASSÁN, F. et al. Everything you must know about *Azospirillum* and its impact on agriculture and beyond. **Biology and Fertility of Soils**, v. 56, n. 4, p. 461–479, 1 maio 2020.

CASSÁN, F.; DIAZ-ZORITA, M. *Azospirillum* sp. in current agriculture: From the laboratory to the field. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 103, p. 117–130, 1 dez. 2016.

CHEN, J. et al. Shoot-to-root communication via GmUVR8-GmSTF3 photosignaling and flavonoid biosynthesis fine-tunes soybean nodulation under UV-B light. **New Phytologist**, v. 241, n. 1, p. 209–226, 1 jan. 2024.

CIPRIANI, L. P. et al. Fisiologia e o manejo do uso de bioinsumos em culturas agrícolas. **Caderno Pedagógico**, v. 22, n. 4, p. e13899, 4 fev. 2025.

ECCO, M. et al. USO DE DIFERENTES TRATAMENTOS DE BIOESTIMULANTE VEGETAL NA CULTURA DA SOJA. **Revista Científica Rural**, v. 21, n. 2, p. 269–286, 2 ago. 2019.

FAGAN, E. B. et al. **Fisiologia vegetal: Reguladores Vegetais**. Piracicaba: Andrei, 2015.

FAGAN, E. F.; REIS, M. R. Aspectos de fisiologia de produção para elevados patamares produtivos em soja. In: FUNDAÇÃO MT. **Boletim de pesquisa**: 2019/2020. Rondonópolis: Fundação Mt, 2019. p. 51-62.

FAROOQ, M. et al. Drought Stress in Grain Legumes during Reproduction and Grain Filling. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 203, n. 2, p. 81–102, 1 abr. 2016.

FERREIRA, D. F. Análise estatística por meio do SISVAR (Sistema para Análise de Variância) para Windows versão 4.0. In: REUNIÃO ANUAL DA REGIÃO BRASILEIRA DA SOCIEDADE INTERNACIONAL DE BIOMETRIA, 45., 2000, São Carlos. Anais... **São Carlos: UFSCar**, 2000. p. 255- 258.

FORTUNE BUSINESS INSIGHTS. **Biostimulants market size, share & industry analysis, by source (microbial and non-microbial), by active ingredient (seaweed extracts, humic substances, vitamins & amino acids, microbial amendments, and others), by application (foliar application, soil treatment, and seed treatment), by crop (row crops, fruits and vegetables, turf & ornamentals, and others), and regional forecast, 2025-2032**. 30 jun. 2025. Disponível em: <https://www.fortunebusinessinsights.com/pt/industry-reports/biostimulants-market-100414>. Acesso em: 1 jul. 2025.

FUKAMI, J.; CEREZINI, P.; HUNGRIA, M. *Azospirillum*: benefits that go far beyond biological nitrogen fixation. **AMB Express**, v. 8, n. 1, 1 dez. 2018.

GUERRIERO, G.; HAUSMAN, J. F.; LEGAY, S. **Silicon and the plant extracellular matrix**. **Frontiers in Plant Science**Frontiers Media S.A. 12 abr. 2016.

GUIMARÃES, V. F. et al. Bactérias Promotoras de Crescimento. **CIÊNCIAS AGRÁRIAS: ética do cuidado, legislação e tecnologia na agropecuária**, n. March, p. 212, 2018.

GUO, S. et al. Foliar application of strigolactones improves the desiccation tolerance, grain yield and water use efficiency in dryland wheat through modulation of non-hydraulic root signals and antioxidant defense. **Stress Biology**, v. 3, n. 1, 1 dez. 2023.

HENDERSON, B. C. R.; SANDERSON, J. M.; FOWLES, A. A review of the foliar application of individual amino acids as biostimulants in plants. **Discover Agriculture**, v. 3, n. 1, 13 maio 2025.

HUNGRIA, M.; et al. Soybean Seed Co-Inoculation with *Bradyrhizobium* spp. and *Azospirillum* brasilense: A New Biotechnological Tool to Improve Yield and Sustainability. **American Journal of Plant Sciences**, v. 06, n. 06, p. 811–817, 2015.

HUNGRIA, Mariangela; NOGUEIRA, Marco Antonio. Tecnologia de inoculação na cultura da soja: mitos, verdades e desafios. In: FUNDAÇÃO MT. **Boletim de pesquisa**: 2019/2020. Rondonópolis: Fundação Mt, 2019. p. 51-62.

JARECKI, W.; BOBRECKA-JAMRO, D. Influence of seed inoculation with commercial bacterial inoculants (*Bradyrhizobium japonicum*) on growth and yield of soybean. **Legume Research**, v. 42, n. 5, p. 688–693, 1 out. 2019.

KÖPPEN BRASIL. **Köppen Brasil: classificação climática**. Disponível em: <https://koppenbrasil.github.io/>. Acesso em: 10 set. 2024.

LOPES, M. J. DOS S. et al. Successful Plant Growth-Promoting Microbes: Inoculation Methods and Abiotic Factors. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 5, 25 fev. 2021.

LUYCKX, M. et al. Silicon and plants: Current knowledge and technological perspectives. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, 23 mar. 2017.

MAPA. **Projeções do agronegócio: brasil-2023/2024 a 2033/2034**. Brasília: Mapa, 2024. 77 p.

MEENA, V. D. et al. A case for silicon fertilization to improve crop yields in tropical soils. **Biological Sciences**, v. 84, n. 3, p. 505–518, 2014.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. 2. ed. Lavras: UFLA, 2006. 729 p.

NAGEL, J. C. O uso do silício na cultura da soja: avanços recentes e impactos na produtividade. **REVISTA DELOS**, v. 17, n. 62, p. e3140, 10 dez. 2024.

NIINEMETS, Ü. Components of leaf dry mass per area - thickness and density - alter leaf photosynthetic capacity in reverse directions in woody plants. **New Phytologist**, v. 144, n. 1, p. 35–47, out. 1999.

OHKUBO, Y. et al. Shoot-to-root mobile polypeptides involved in systemic regulation of nitrogen acquisition. **Nature Plants**, v. 3, 20 mar. 2017.

PURALEWSKI, A. “**Staphyt lidera o registro de produtos biológicos no Brasil e na Europa**”: um artigo na **AgriBusiness Global**. **Staphyt Brasil**, 2024. Disponível em: <https://staphyt.com/br/news-and-insights/bioativos/staphyt-registro-produtos-biologicos-artigo-agribusiness-global/>. Acesso em: 30 abr. 2025.

RONDINA, A. B. L. et al. Changes in root morphological traits in soybean co-inoculated with *Bradyrhizobium* spp. and *Azospirillum brasilense* or treated with *A. brasilense* exudates. **Biology and Fertility of Soils**, v. 56, n. 4, p. 537–549, 1 maio 2020.

SANGIOVO, M. J. R. et al. Can re-inoculation with *Bradyrhizobium* and *Azospirillum* in soybean crops be a strategy to increase productivity? **Revista Brasileira de Ciencias Agrarias**, v. 19, n. 4, 2024.

SANTIAGO, A. D. et al. Soybean production in SEALBA: inoculation, co-inoculation, and starter nitrogen fertilization. **Acta Scientiarum - Agronomy**, v. 46, n. 1, 2024.

SCHULZE, A. et al. Wound-Induced Shoot-to-Root Relocation of JA-Ile Precursors Coordinates Arabidopsis Growth. **Molecular Plant**, v. 12, n. 10, p. 1383–1394, 7 out. 2019.

SHABALA, S. et al. Root-to-shoot signalling: Integration of diverse molecules, pathways and functions. **Functional Plant Biology**, v. 43, n. 2, p. 87–104, 2016.

SHARMA, B. et al. Silicon and plant nutrition—dynamics, mechanisms of transport and role of silicon solubilizer microbiomes in sustainable agriculture: A review. **Pedosphere**, v. 33, n. 4, p. 534–555, 1 ago. 2023.

SUGIYAMA, A. The soybean rhizosphere: Metabolites, microbes, and beyond—A review. **Journal of Advanced Research**, v. 19, p. 67–73, set. 2019.

TAGLIAPIETRA, E. L. et al. **Ecofisiologia da Soja Visando Altas**. 2. ed. Santa Maria-RS: Field Crops, 2022.

TAIZ, L. et al. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal Diversidade vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 2017. v. 6 ed.

TEIXEIRA, W. F. et al. Amino Acids as Stress Reducers in Soybean Plant Growth Under Different Water-Deficit Conditions. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 39, n. 2, p. 905–919, 1 jun. 2020.

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, 1 jan. 2021.

6. CONCLUSÕES GERAIS

O presente trabalho contribuiu para entendimento agrônomo da coinoculação de *B. japonicum* com bactérias promotoras de crescimento vegetal, associada à aplicação foliar de bioestimulantes, como uma estratégia sustentável para a cultura da soja. Os resultados obtidos, tanto em condições de campo quanto em ambiente protegido, demonstraram que essas práticas interferem positivamente em variáveis morfofisiológicas, contribuindo para o crescimento, eficiência fisiológica e desenvolvimento reprodutivo da planta.

No experimento de campo, a coinoculação com *A. brasilense* proporcionou maior relação raiz/parte aérea, indicando redirecionamento de assimilados para a formação de um sistema radicular mais robusto. A associação com estirpes de *Bacillus* influenciou diretamente as trocas gasosas, modificando a relação Ca/Ci e a eficiência no uso da água. Embora não tenham sido observadas diferenças em todos os parâmetros analisados, os dados indicam que determinadas combinações microbianas possam ser interessantes ao serem empregadas sob condições edafoclimáticas específicas.

Em casa de vegetação, a interação entre coinoculação e bioestimulantes foliares promoveu efeitos sinérgicos mais evidentes. A combinação entre *A. brasilense* e regulador vegetal elevou a área foliar, a massa seca da parte aérea e os índices de eficiência fotossintética, além de favorecer a formação inicial de vagens. A aplicação isolada de silício e aminoácidos também apresentou efeitos positivos, ainda que mais restritos, demonstrando que a escolha do bioestimulante influencia diretamente os padrões de resposta da cultura.

Embora apenas o Capítulo 2 tenha avaliado variáveis relacionadas à produtividade por planta, a ausência de diferenças estatísticas nesses parâmetros não invalida os efeitos fisiológicos observados. Pelo contrário, reforça a complexidade das interações entre planta, microrganismos e bioestimulantes, em que fatores como o hábito de crescimento da cultivar, o tempo de resposta fisiológica, as condições ambientais e o sistema de cultivo modulam regulam o comportamento apresentado pela soja.

Dessa forma, contata-se que o manejo integrado com BPCV e bioestimulantes possui efeito promissor na promoção do crescimento e na estabilidade fisiológica da soja. Contudo, sua eficácia depende da compatibilidade entre os microrganismos utilizados, do tipo e do momento de aplicação dos bioestimulantes, bem como das condições de cultivo. Novos estudos, com diferentes

genótipos, tipos de produção e ambientes edafoclimáticos distintos, são necessários tanto para compreender essas práticas como componentes tecnicamente viáveis em sistemas produtivos de alta eficiência e sustentabilidade, quanto para identificar suas limitações e ajustar o manejo conforme o contexto.

Em relação às hipóteses, o primeiro capítulo confirma-se que diferentes formulações de BPCV interferem na biometria e fisiologia da soja, com destaque para efeitos sobre a razão raiz/parte aérea e variáveis de trocas gasosas. A segunda hipótese, referente ao efeito sinérgico entre coinoculação e bioestimulantes, foi confirmada, especialmente para a associação entre *A. brasilense* e regulador vegetal, que resultou em respostas fisiológicas e reprodutivas superiores às dos tratamentos isolados.