



# **UNIVERSIDADE PARANAENSE – UNIPAR**

Recredenciada pela portaria – MEC n.º 747, de 10/09/2020 – D.o.u. 11/09/2020

Mantenedora: UNIPAR – SOCIEDADE EMPRESARIAL LTDA.

Coordenação de Pós-graduação *Stricto Sensu* e Pesquisa

Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia Aplicada à Agricultura

Jose Junior Severino

**Bioestimulantes e manejo hídrico sobre produção e qualidade fisiológica de sementes de soja em duas safras no Arenito Caiuá**

Umuarama

2026

Jose Junior Severino

**Bioestimulantes e manejo hídrico sobre produção e qualidade fisiológica de sementes de soja em duas safras no Arenito Caiuá**

Tese apresentada como parte das exigências para a obtenção do grau de Doutor em Biotecnologia Aplicada à Agricultura pela Universidade Paranaense – UNIPAR.

Orientador: Prof. Dr. Thiago Alberto Ortiz  
Coorientador: Prof. Dr. João Paulo Franscisco

**Umuarama  
2026**

## Ficha Catalográfica

S498b Severino, José Júnior.

Bioestimulantes e manejo hídrico sobre produção e qualidade fisiológica de sementes de soja em duas safras no Arenito Caiuá / José Júnior Severino. – Umuarama : Universidade Paranaense - UNIPAR, 2026.

94 f.

Orientador: Dr. Thiago Alberto Ortiz.

Tese (Doutorado) – Universidade Paranaense - UNIPAR.

1. *Glycine max*. 2. Déficit hídrico. 3. Bioestimulantes. 4. Vigor de sementes. 5. Germinação. I. Universidade Paranaense - UNIPAR. II. Título.

(21 ed.) CDD: 633.34

Bibliotecária Responsável Regiane Luiza Campaneli CRB 9/2194

**Bioestimulantes e manejo hídrico sobre produção e qualidade fisiológica de  
sementes de soja em duas safras no Arenito Caiuá**

Tese aprovada como requisito obrigatório para obtenção do Grau de Doutor no Programa de Pós-graduação em Biotecnologia Aplicada à Agricultura da Universidade Paranaense -UNIPAR, pela seguinte banca examinadora:

---

Dra. Lúgia Maria Maraschi da Silva Piletti  
Instituto Federal de Mato Grosso do Sul – IFMS

---

Dra. Maria Graciela Iecher Faria Nunes  
Universidade Paranaense – UNIPAR

---

Dra. Juliana Silveira do Valle  
Universidade Paranaense – UNIPAR

---

Dr. João Paulo Francisco  
Universidade Estadual de Maringá – UEM

---

Dr. Thiago Alberto Ortiz  
Universidade Paranaense – UNIPAR

Umuarama 23 de abril de 2026  
**AGRADECIMENTOS**

A Deus, em primeiro lugar, pela vida, pela saúde e por me conceder sabedoria e perseverança, guiando-me ao longo desta jornada.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Thiago Alberto Ortiz, pela confiança, orientação e valiosas contribuições no decorrer deste trabalho.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. João Paulo Francisco, pela dedicação, apoio e importantes sugestões que foram fundamentais ao longo dessa pesquisa.

À Profa. Dra. Zilda Cristiani Gazim, pelo incentivo e ensinamentos que enriqueceram ainda mais minha formação acadêmica

À banca examinadora, Profa. Dra. Maria Graciela Iecher Faria Nunes e Profa. Dra. Juliana Silveira do Valle, pelas contribuições relevantes ao aprimoramento deste estudo.

Aos demais professores do Programa de Pós-Graduação, pelos ensinamentos compartilhados e pela contribuição na minha formação acadêmica.

Aos colegas Tarcísio Miguel Teixeira e Léo Mathias Miloca, pelo apoio e companheirismo ao longo desta jornada.

Aos colaboradores da secretaria do Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia Aplicada à Agricultura: Gabriela Fernanda Tozati, Gabriella Santana de Oliveira, Milena Almeida da Silva, Rafaela Kaulfuss da Rosa e Sidney Bravo Junior, pela dedicação, eficiência e atenção sempre demonstradas no atendimento.

À instituição Universidade Paranaense – UNIPAR, pelo apoio institucional e suporte educacional e estrutural aos alunos de pós-graduação.

À Universidade Estadual de Maringá em nome dos professores Dr. João Paulo Francisco, Dr. Júlio César Guerreiro e a Dra. Juliana Parisotto, sempre incentivando.

À minha família: meus pais, Jose Antônio e Alda, (*in memoriam*), e meus irmãos, Fátima (*in memoriam*), Lúcia, Marcia, Célia, Ângela, Pedro, Geraldo, Luciana e Lucimar, pelo amor e apoio em todas as decisões e conquistas.

Ao Murilo, expresse minha sincera gratidão, pelas valiosas sugestões e constante suporte nos momentos de maior pressão, possibilitando a realização deste trabalho.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1.</b> Painel climáticos das safras 2023/24 e 2024/25 com dados de temperatura média diária (A); umidade relativa do ar (B); radiação global (C); evapotranspiração de referência (D); chuva diária e acumulada (E); armazenamento de água no solo (F).....                                                                                                                                                                                                                                                                          | 25 |
| <b>Figura 2.</b> Médias de produtividade da interação lâmina × inoculante para as safras 2023/24 (A) e 2024/25 (B).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 26 |
| <b>Figura 3.</b> Ordenação NMDS baseada nas variáveis avaliadas no experimento. (A) Agrupamento por ano agrícola. (B) Agrupamento por tratamento. (C) Stressplot mostrando excelente qualidade de ajuste ( $R^2$ não-métrico = 0,947). Cada ponto representa todas as variáveis de uma parcela experimental. Au – <i>B. aryabhattai</i> ; Az – <i>A. brasilense</i> ; Bac – <i>B. subtilis</i> + <i>B. megaterium</i> ; Test – <i>B. japonicum</i> .....                                                                                       | 33 |
| <b>Figura 4.</b> Análise Procrustes aplicada ao conjunto de variáveis avaliadas nas safras 2023/24 e 2024/25. (A) Comparação direta entre as ordenações multivariadas dos dois anos e (B) Deslocamento multivariado de cada tratamento (combinação lâmina × inoculante) entre 2023/24 e 2024/25. Au – <i>B. aryabhattai</i> ; Az – <i>A. brasilense</i> ; Bac – <i>B. subtilis</i> + <i>B. megaterium</i> ; Test – <i>B. japonicum</i> .....                                                                                                   | 35 |
| <b>Figura 5.</b> Heatmaps de correlação das variáveis respostas nas safras 2023/24 (A) e 2024/25 (B), com agrupamento hierárquico por distância euclidiana e correlações de Pearson.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 38 |
| <b>Figura 6.</b> GGE Biplot das combinações de lâmina × inoculante nas safras 2023/24 e 2024/25, apresentando o desempenho médio (PC1), estabilidade (PC2), (A) Gráfico “Which-won-where”, destacando os tratamentos mais responsivos em cada safra; (B) Relação entre média e estabilidade, permitindo identificar os tratamentos com melhor desempenho geral; (C) Ranking dos tratamentos segundo o modelo GGE, integrando produtividade e estabilidade; (D) Relação entre as safras, evidenciando o grau de similaridade entre 2023/24..... | 40 |
| <b>Figura 7.</b> Temperaturas máxima, média, mínima em °C e precipitação pluviométrica em mm, mensal nas safras agrícolas 2023/2024 vs 2024/2025 .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 61 |
| <b>Figura 8.</b> Germinação – G de sementes de soja em função da lâmina de irrigação para cada bioestimulante e ano agrícola interação (A x B x C).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 77 |
| <b>Figura 9.</b> Comprimento da parte aérea – CPA em função da lâmina de água, para cada bioestimulante e ano agrícola (A x B x C).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 79 |
| <b>Figura 10.</b> Massa seca da parte aérea – MSPA em função da lâmina de água, para cada                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |    |

bioestimulante e ano agrícola (A x B x C).....81

**Figura 11.** Comprimento da raiz – CR em função da lâmina de água, para cada bioestimulante e ano agrícola (A x B x C)..... 82

**Figura 12.** Massa seca da raiz – MSR em função da lâmina de água, para cada bioestimulante e e ano agrícola (A x B x C).....84

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabela 1.</b> Caracterização química do solo da área experimental.....                                                                                                                                                                                                                                                    | 19 |
| <b>Tabela 2.</b> Caracterização física e hídrica do solo da área experimental.....                                                                                                                                                                                                                                           | 20 |
| <b>Tabela 3.</b> Valores de coeficiente de cultivo da soja.....                                                                                                                                                                                                                                                              | 21 |
| <b>Tabela 4.</b> Valores de umidade de saturação ( $\theta_s$ ) e residual ( $\theta_r$ ) dos parâmetros empíricos ( $\alpha$ , $n$ e $m$ ) do modelo de Van Genuchten (1980).....                                                                                                                                           | 22 |
| <b>Tabela 5.</b> Produtividade de grãos de soja ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) em função da interação entre lâminas de irrigação e inoculação bioestimulantes na safra 2023/24.....                                                                                                                                                 | 27 |
| <b>Tabela 6.</b> Produtividade de grãos de soja ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) em função da interação entre lâminas de irrigação e inoculação bioestimulantes na safra 2024/25.....                                                                                                                                                 | 28 |
| <b>Tabela 7.</b> Estatísticas descritivas da produtividade de grãos de soja nas safras 2023/24 e 2024/25, e considerando as combinações entre lâminas de irrigação inoculantes considerando as combinações entre lâminas de reposição de água e inoculantes avaliados.....                                                   | 29 |
| <b>Tabela 8.</b> Análise de variância, considerando os efeitos nas safras 2023/24 e 2024/25 de lâminas de irrigação, inoculantes e interações na produtividade de grãos de soja.....                                                                                                                                         | 30 |
| <b>Tabela 9.</b> Tamanho de efeito dos fatores e interações do modelo fatorial, estimado pelos coeficientes $\eta^2$ , partial $\eta^2$ e $\omega^2$ .....                                                                                                                                                                   | 31 |
| <b>Tabela 10.</b> Análise de variância da Geminação – G, comprimento de parte aérea – CPA, comprimento da radícula – CR, massa seca da parte aérea – MSPA, massa seca da radícula – MSR, massa seca do cotilédone – MSC de sementes de soja produzidas sob lâminas de irrigação e bioestimulantes em dois anos agrícola..... | 64 |
| <b>Tabela 11.</b> Variáveis biométricas de plântulas de soja oriundas de sementes tratadas com bioestimulantes nas safras 2023/24 e 2024/25.....                                                                                                                                                                             | 66 |
| <b>Tabela 12.</b> Germinação – G de plântulas de soja oriundas de sementes tratadas com bioestimulantes sob diferentes lâminas de irrigação dados combinados das safras 2023/24 e 2024/25.....                                                                                                                               | 69 |
| <b>Tabela 13.</b> Comprimento da parte aérea – CPA de plântulas de soja oriundas de sementes tratadas com bioestimulantes sob diferentes lâminas de irrigação.....                                                                                                                                                           | 70 |
| <b>Tabela 14.</b> Comprimento da radícula – CR de plântulas de soja oriundas de sementes tratadas com bioestimulantes sob diferentes lâminas de irrigação.....                                                                                                                                                               | 71 |
| <b>Tabela 15.</b> Massa seca da parte aérea – MSPA de plântulas de soja oriundas de                                                                                                                                                                                                                                          |    |

sementes tratadas com bioestimulantes sob diferentes lâminas de irrigação.....72

**Tabela 16.** Massa seca da radícula – MSR de plântulas de soja oriundas de sementes tratadas com bioestimulantes sob diferentes lâminas de irrigação.....74

**Tabela 17.** Massa seca de cotilédones – MC plântulas de soja oriundas de sementes tratadas com bioestimulantes e diferentes lâminas de irrigação.....75

## SUMÁRIO

|                                                                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>RESUMO:</b> Bioestimulantes e manejo hídrico sobre produção e qualidade fisiológica de sementes de soja em duas safras no Arenito Caiuá.....      | 11 |
| <b>ABSTRACT</b> .....                                                                                                                                | 13 |
| <b>CAPÍTULO I:</b> Avaliação da Produtividade de Grãos de Soja sob Tratamentos com Bioestimulantes Promotores de Crescimento e Lâminas de Água ..... | 15 |
| <b>RESUMO</b> .....                                                                                                                                  | 15 |
| <b>1 INTRODUÇÃO</b> .....                                                                                                                            | 16 |
| <b>2 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....                                                                                                                    | 18 |
| 2.1 Caracterização da área.....                                                                                                                      | 19 |
| 2.2 Tratamentos e delineamento experimental .....                                                                                                    | 20 |
| 2.3 Manejo da irrigação.....                                                                                                                         | 21 |
| 2.4 Variáveis analisadas .....                                                                                                                       | 22 |
| 2.5 Análise dos dados.....                                                                                                                           | 23 |
| <b>3 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....                                                                                                                | 24 |
| <b>4 CONCLUSÕES</b> .....                                                                                                                            | 42 |
| <b>5 REFERÊNCIAS</b> .....                                                                                                                           | 45 |
| <b>CAPÍTULO II:</b> Qualidade Fisiológica de Sementes de Soja Produzidas sob Diferentes Lâminas de Irrigação e Bioestimulantes em Duas Safras .....  | 59 |
| <b>RESUMO</b> .....                                                                                                                                  | 59 |
| <b>1 INTRODUÇÃO</b> .....                                                                                                                            | 60 |
| <b>2 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....                                                                                                                    | 61 |
| 2.1 Tratamento e delineamento experimental .....                                                                                                     | 61 |
| 2.2 Avaliação da qualidade fisiológica das sementes .....                                                                                            | 62 |
| 2.2.1 Teste de germinação .....                                                                                                                      | 63 |
| 2.2.2 Teste de comprimento de plântulas .....                                                                                                        | 63 |
| <b>3 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....                                                                                                                | 64 |
| 3.1 Interação Safra × Tratamento biológico .....                                                                                                     | 66 |
| 3.2 Interação Lâmina de irrigação × Tratamento biológico: Germinação – G .....                                                                       | 68 |
| 3.3 Interação Lâmina × Tratamento: Comprimento da parte aérea – CPA .....                                                                            | 69 |
| 3.4 Interação Lâmina × Tratamento Comprimento da radícula – CR .....                                                                                 | 71 |
| 3.5 Interação Lâmina × Tratamento: Massa seca da parte aérea – MSPA .....                                                                            | 72 |
| 3.6 Interação Lâmina × Tratamento: Massa seca de radícula – MSR .....                                                                                | 74 |
| 3.7 Interação Lâmina × Tratamento: Massa seca de cotilédones – MSC .....                                                                             | 74 |
| 3.8 Interação tripla Safra x lâmina de irrigação x Bioestimulante – (A x B x C).....                                                                 | 74 |
| <b>4 CONCLUSÃO</b> .....                                                                                                                             | 88 |
| <b>5 REFERÊNCIAS</b> .....                                                                                                                           | 89 |

### Bioestimulantes e manejo hídrico sobre produção e qualidade fisiológica de sementes de soja em duas safras no Arenito Caiuá

**RESUMO** A cultura da soja *Glycine max* (L.) Merr., destaca-se entre as leguminosas de maior relevância no cenário mundial, devido ao amplo cultivo e elevada demanda por grãos. Sua importância está associada a diversos segmentos industriais, impulsionada pelo alto teor de proteínas e óleo. Diante das mudanças climáticas e crescente demanda por alimentos, a produtividade dos grãos é influenciada por fatores, como: genética da planta, altas temperatura, tipo de solo e disponibilidade hídrica. Diante disso, o manejo racional da água e adoção de produtos biológicos, eleva níveis de produtividade e sustentabilidade no setor agrícola: **Capítulo 1:** O objetivo do estudo foi avaliar ao longo de duas safras agrícolas, os efeitos de cinco diferentes lâminas de irrigação e quatro tratamentos de sementes utilizando bioestimulantes promotores de crescimento, sobre características reprodutivas na cultura da soja. Os tratamentos foram 5 diferentes lâminas de irrigação (0, 50, 75, 100 e 125%) da evapotranspiração da cultura Etc, e quatro tratamentos biológicos tratamento 1. Rhizotrop 2<sup>®</sup> + SolubPhos<sup>®</sup> (*Bradyrhizobium japonicum* + *Bacillus subtilis* + *Bacillus megaterium*); tratamento 2. Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Azotrop<sup>®</sup> (*Bradyrhizobium japonicum* + *Azospirillum brasilense*); tratamento 3. Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Auras<sup>®</sup> (*Bradyrhizobium japonicum* + *B. aryabhattai*); tratamento 4. Rhizotrop 2<sup>®</sup> (*Bradyrhizobium japonicum*). O experimento foi conduzido em blocos casualizados (fatorial 5×4), permitindo análises comparativas e quantitativas das interações. A análise descritiva evidenciou forte heterogeneidade de produtividade nas lâminas (50% e 75% ETc), apresentando maiores amplitudes e coeficientes de variação. A ANOVA revelou efeitos significativos ( $p < 0,001$ ) para lâmina e inoculante, evidenciando que a irrigação respondeu por 43% da variação da produtividade. Os tamanhos de efeito ( $\eta^2$ ,  $\eta^2$  parcial e  $\omega^2$ ) confirmaram a lâmina como o fator de maior importância, seguida pela interação Ano× Lâmina, reforçando que o regime hídrico influenciou cada safra. As abordagens multivariadas evidenciaram a complexidade das respostas fisiológicas. O Escalonamento Multidimensional Não-Métrico (NMDS) revelou separação entre as safras, indicando efeito ambiental sobre as variáveis. A análise Procrustes confirmou estabilidade temporal reduzida em lâminas elevadas e maior estabilidade em condições restritivas (0% e 50% ETc), sugerindo que a restrição hídrica limita a plasticidade fisiológica. Os heatmaps de correlação mostraram padrões distintos entre anos, e maior integração na reprodução, nodulação e massa de mil grãos em 2025, enquanto 2024 foi fragmentada, compatível com restrição hídrica e estresse térmico. O GGE-Biplot sintetizou a interação tratamento × ambiente identificando os mais produtivos e estáveis. As lâminas de 100% da ETc – com Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Azotrop<sup>®</sup>, Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Auras<sup>®</sup> ou Rhizotrop 2<sup>®</sup> - superou o desempenho médio e na estabilidade entre safras. Combinações com 75% da ETc apresentaram bom desempenho, sobretudo associadas à co-inoculação de Rhizotrop 2<sup>®</sup> + SolubPhos<sup>®</sup> e Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Azotrop<sup>®</sup>. As safras representaram ambientes contrastantes, desta forma o manejo hídrico e a inoculação influenciam o crescimento e a produtividade da soja. Irrigação moderada (75-100% ETc), e inoculantes promotores de crescimento, otimizavam a produtividade reduzindo a instabilidade climáticas. **Capítulo II:** O estudo avaliou o efeito residual (carry-over) de bioestimulantes promotores de crescimento vegetal associados a diferentes lâminas de irrigação sobre a qualidade fisiológica e o vigor de sementes de soja. O experimento foi conduzido em delineamento de blocos casualizados com arranjo fatorial 2 × 5 × 4, analisando dois anos agrícolas, cinco lâminas de irrigação (0, 50, 75,

100 e 125%) e quatro tratamentos biológicos, (1. Rhizotrop 2<sup>®</sup> + SolubPhos<sup>®</sup>; 2. Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Azotrop<sup>®</sup>; 3. Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Auras<sup>®</sup>; 4. Rhizotrop 2<sup>®</sup>). Após a colheita, as sementes foram submetidas a análises laboratoriais de germinação, comprimento e massa seca de plântulas e cotilédones, com resultados validados pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ). Os resultados indicaram que a safra 2024/2025 restringiu o vigor das plântulas em comparação à anterior, e a ausência de irrigação (0%) reduziu a germinação e a biomassa inicial em todos os tratamentos. Contudo, o consórcio Rhizotrop 2<sup>®</sup> + SolubPhos<sup>®</sup> funcionou como um eficiente atenuador de estresse hídrico severo, conferindo efeito de priming fisiológico transgeracional à progênie e garantindo estabilidade homeostática do crescimento com menor exaustão das reservas dos cotilédones. Por fim, os tratamentos apresentaram respostas específicas à umidade: o Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Azotrop<sup>®</sup> exigiu um suprimento hídrico mínimo de 75% para expressar incrementos no vigor, enquanto o Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Auras<sup>®</sup> conferiu plasticidade e proteção da raiz sob condições de excesso hídrico (125%).

**Palavras-chave** *Glycine max.* déficit Hídrico. Bioestimulantes. Vigor de Sementes. Germinação.

### **Biostimulants and water management on the yield and physiological quality of soybean seeds across two crop seasons in the Arenito Caiuá region**

**ABSTRACT** Soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] stands out among the world's most important legumes due to its widespread cultivation and high demand for grain. Its importance is tied to numerous industrial sectors, driven by its high protein and oil content. Given climate change and growing food demand, grain yield is influenced by factors such as plant genetics, high temperatures, soil type, and water availability. Accordingly, rational water management and the adoption of biological products can raise productivity and sustainability levels in the agricultural sector. **Chapter 1:** The objective of this study was to evaluate, across two agricultural growing seasons, the effects of five irrigation depths and four seed treatments using growth-promoting biostimulants on reproductive traits in soybean. Treatments consisted of five irrigation depths (0, 50, 75, 100, and 152% of crop evapotranspiration, ET<sub>c</sub>) and four biological treatments: 1. Rhizotrop 2<sup>®</sup> + SolubPhos<sup>®</sup> (*Bradyrhizobium japonicum* + *Bacillus subtilis* + *Bacillus megaterium*); treatments 2. Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Azotrop<sup>®</sup> (*Bradyrhizobium japonicum* + *Azospirillum brasilense*); treatments 3. Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Auras<sup>®</sup> (*Bradyrhizobium japonicum* + *B. aryabhattai*); treatments 4. Rhizotrop 2<sup>®</sup> (*Bradyrhizobium japonicum*). The experiment was conducted in a randomized block design (5 × 4 factorial), allowing for comparative and quantitative analyses of interaction effects. Descriptive analysis revealed strong yield heterogeneity at the 50% and 75% ET<sub>c</sub> depths, which showed the widest ranges and highest coefficients of variation. ANOVA revealed significant effects ( $p < 0.001$ ) for both irrigation depth and inoculant, with irrigation depth accounting for 43% of yield variation. Effect sizes ( $\eta^2$ , partial  $\eta^2$ , and  $\omega^2$ ) confirmed irrigation depth as the most influential factor, followed by the Year × Depth interaction, reinforcing that water regime effects differed by growing season. Multivariate approaches revealed the complexity of the physiological responses. Non-metric Multidimensional Scaling (NMDS) revealed separation between growing seasons, indicating an environmental effect on the variables studied. Procrustes analysis confirmed reduced temporal stability at higher irrigation depths and greater stability under restrictive conditions (0% and 50% ET<sub>c</sub>), suggesting that water restriction limits physiological plasticity. Correlation heatmaps showed distinct patterns between years, with greater integration among reproduction, nodulation, and thousand-seed weight in 2025, whereas 2024 showed a more fragmented pattern, consistent with water restriction and heat stress. The GGE biplot synthesized the treatment × environment interaction, identifying the most productive and stable combinations. Irrigation at 100% ET<sub>c</sub> combined with Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Azotrop<sup>®</sup>, Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Auras<sup>®</sup>, or Rhizotrop 2<sup>®</sup> alone outperformed the overall mean and showed the greatest stability across growing seasons. Combinations at 75% ET<sub>c</sub> also performed well, particularly with co-inoculation of Rhizotrop<sup>®</sup> 2 + SolubPhos<sup>®</sup> and Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Azotrop<sup>®</sup>. The two growing seasons represented contrasting environments; accordingly, both water management and inoculation influenced soybean growth and yield. Moderate irrigation (75 - 100% ET<sub>c</sub>) combined with growth-promoting inoculants optimized yield while reducing climate-related instability. **Chapter II:** This study evaluated the residual (carry-over) effect of plant growth-promoting biostimulants combined with different irrigation depths on the physiological quality and vigor of soybean seeds. The experiment was conducted in a randomized block design with a 2 × 5 × 4 factorial arrangements, analyzing two growing seasons, five irrigation depths (0, 50, 75, 100, and 125%), and four biological treatments: Treatment 1. Rhizotrop 2<sup>®</sup> +

SolubPhos<sup>®</sup>, Treatment 2. Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Azotrop<sup>®</sup>, Treatment 3. Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Auras<sup>®</sup> and Treatment 4. Rhizotrop 2<sup>®</sup>. After harvest, seeds were subjected to laboratory analyses of germination, seedling and cotyledon length and dry mass, with results validated by the Scott-Knott test ( $p < 0.05$ ). Results indicated that the 2024/2025 growing season restricted seedling vigor relative to the previous season, and the absence of irrigation (0%) reduced germination and initial biomass across all treatments. However, the bacterial consortium Rhizotrop 2<sup>®</sup> + SolubPhos<sup>®</sup> acted as an effective attenuator of severe water stress, conferring a transgenerational physiological priming effect on progeny and ensuring homeostatic growth stability with reduced depletion of cotyledon reserves. Finally, treatments showed treatment-specific responses to moisture availability: Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Azotrop<sup>®</sup> required a minimum water supply of 75% to express increases in vigor, whereas Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Auras<sup>®</sup> conferred plasticity and root protection under conditions of water excess (125%).

**Keywords** *Glycine max.* Water deficit. Biostimulants. Seed vigor. Germination.

## CAPÍTULO I

### Avaliação da Produtividade de Grãos de Soja sob Tratamentos com Bioestimulantes Promotores de Crescimento e Lâminas de Água

**RESUMO** A produtividade da soja resulta de interações entre manejo hídrico, ambiente e atividade de microrganismos promotores de crescimento de plantas. O objetivo do estudo foi avaliar ao longo de duas safras agrícolas (2023/24 e 2024/25), os efeitos da combinação de diferentes lâminas de irrigação (0, 50, 75, 100 e 125% da ETc) e quatro tratamentos inoculantes aplicados às sementes. Tratamento 1. Rhizotrop 2<sup>®</sup> + SolubPhos<sup>®</sup> (*Bradyrhizobium japonicum* + *Bacillus subtilis* + *Bacillus megaterium*); Tratamento 2. Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Azotrop<sup>®</sup> (*Bradyrhizobium japonicum* + *Azospirillum brasilense*) e Tratamento 3. Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Auras<sup>®</sup> (*Bradyrhizobium japonicum* + *Bacillus aryabhattai*); Tratamento 4. Rhizotrop 2<sup>®</sup> (*Bradyrhizobium japonicum*). O delineamento experimental foi em blocos casualizados (fatorial 5×4), conduzido em duas safras permitindo análises comparativas e quantitativas das interações. A análise descritiva indicou forte heterogeneidade na produtividade, nas lâminas (50% e 75% ETc), com maiores amplitudes e coeficientes de variação. A ANOVA revelou efeitos significativos ( $p < 0,001$ ) para os fatores lâmina, inoculante, e suas interações, destacando a lâmina responsável por 43% da variação total da produção. Os tamanhos de efeito confirmaram a lâmina como o fator de maior importância, seguida pela interação Ano × Lâmina, reforçando a influência do regime hídrico em cada safra. As análises multivariadas destacaram a complexidade das respostas fisiológicas. O Escalonamento Multidimensional Não-Métrico (NMDS) revelou clara separação entre os anos, indicando efeito ambiental sobre as variáveis. A análise Procrustes confirmou menor estabilidade nas lâminas elevadas e maior estabilidade em condições restritivas (0% e 50% ETc), sugerindo que ambientes com restrição hídrica limitam a plasticidade fisiológica. Os heatmaps mostraram padrões distintos entre anos, com maior integração entre componentes reprodutivos, nodulação e massa de mil grãos em 2025, enquanto em 2024 as correlações foram mais fragmentadas, compatíveis com restrição hídrica e estresse térmico. O GGE-Biplot identificou produtividade maior em lâminas de 100% da ETc - sobretudo quando Coinoculados com Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Azotrop<sup>®</sup>, Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Auras<sup>®</sup> ou Rhizotrop 2<sup>®</sup>. Combinações com 75% da ETc também obteve bom desempenho, sobretudo com Rhizotrop 2<sup>®</sup> + SolubPhos<sup>®</sup> e Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Azotrop<sup>®</sup>. As safras representaram ambientes contrastantes, reforçando a necessidade de manejo adaptado a condições variáveis. Conclui-se que o manejo hídrico e a inoculação atuam de forma sinérgica no crescimento e produtividade da soja. A adoção de níveis de irrigação entre 75-100% ETc, aliada ao uso de inoculantes, surge como estratégia promissora otimizando a produtividade e reduzindo a instabilidade às variações climáticas.

**Palavras-chaves** *Glycine max*; déficit Hídrico; Lâminas de irrigação; Bioestimulantes; Multivariada.

## 1 INTRODUÇÃO

A soja *Glycine max* (L.) Merr. pertence à família Fabaceae e é uma espécie de leguminosa de importância mundial, tanto econômica como nutricional, cultivada na China há quase 5.000 anos (Hu *et al.*, 2023). Os programas de melhoramento genético da soja no Brasil resultaram de vários cruzamentos, partindo de um pequeno número de cultivares dos EUA nas décadas de 1950 e 1960. Esse processo levou à tropicalização, isto é, adaptação da cultura às condições climáticas do Brasil (Silva *et al.*, 2025).

Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento, a produção de soja para a safra 2024/2025 foi de 171.481 milhões de toneladas, com área aproximada de 47,346 milhões de hectares para uma produtividade média de 3.622 kg ha<sup>-1</sup>, e a previsão para a safra 2025/2026 é de 177,601 milhões de toneladas com área aproximada de 49,063 milhões de hectares para uma produtividade média de 3.620 kg ha<sup>-1</sup> (CONAB, 2025).

A soja desempenha um papel essencial como cultura de importância global, contribuindo de forma significativa e estando presente em uma ampla variedade de derivados e pesquisas científicas (Mishra *et al.*, 2024). Existe uma necessidade inegável de que os sistemas alimentares mundiais, sejam reestruturados com o objetivo de alcançar maiores produtividades, garantindo a sustentabilidade (Zhang *et al.*, 2024).

Os grãos de soja, parte consumível desta espécie, possuem alto teor de fibra, vitaminas e minerais. Desempenham papel fundamental na nutrição humana e animal, constituindo fonte de proteínas (41,38 - 44,32%), carboidratos (30,35 - 32,8%), fibras (27,61 - 30,47%), lipídios (10,37 - 18,56%), vitaminas (B, C e E), minerais como sódio, potássio, fósforo e ferro, bem como compostos bioativos, saponinas, ácidos fenólicos, isoflavonas e antocianinas (Zhou *et al.*, 2025; Koriyama *et al.*, 2023).

Mudanças climáticas globais têm ocorrido recentemente causando danos bióticos e abióticos, contribuindo à uma série de ameaças à segurança alimentar refletindo em toda a cadeia de sustentabilidade da produção vegetal (Seleiman *et al.*, 2021). A variabilidade climática marcada por altas temperaturas, alterações de precipitação e frequência de eventos climáticos extremos, têm impactado significativamente a agricultura (Abebaw, 2025). O setor agropecuário perdeu cerca de US\$ 3,8 trilhões em todo o mundo devido as catástrofes climáticas nos últimos 30 anos, conforme Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO, 2023).

A escassez hídrica representa um desafio ambiental restringindo a produtividade agrícola, seus efeitos ocorrem conforme a intensidade e o período de ocorrência (Soliman

*et al.*, 2025). O déficit hídrico é o estresse abiótico mais prejudicial a produção de soja, representando perdas de 40% da produtividade (Bigolin; Talamini, 2024). Estiagem três semanas antecedendo o período de colheita da soja, a produtividade pode ser reduzida em até 65%. Ocorrência de déficit hídrico na fase de florescimento, a produtividade da soja pode ser reduzida alcançando perdas de 59,63% (Wang *et al.*, 2025). Porém, se o déficit hídrico ocorrer na fase de enchimento de grãos, as perdas podem ser ainda maiores atingindo 88% (Rolbieck *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2025).

Solos extremamente arenosos, são produtivos tanto quanto solos de outras classes texturais. No entanto, só é possível com práticas de manejo adequadas, melhorando a qualidade física, química e biológica do solo, mantendo a cobertura vegetal e matéria orgânica (Ramos *et al.*, 2025). Práticas sustentáveis, como sistemas de irrigação eficientes e fertilização otimizada, são essenciais à produtividade agrícola e a sustentabilidade ambiental (Mir *et al.*, 2025). Portanto, o aprimoramento no uso da água e fertilizantes é de fundamental importância para incrementos na produtividade (Wu *et al.*, 2025).

Mundialmente a escassez de água representa um risco considerável a produção agrícola. Aumentar a resiliência a seca em cultivos por meio de insumos microbianos, é uma abordagem viável para suprir as exigências de uma população em crescimento (Eswaran *et al.*, 2024). A utilização de bioestimulantes microbianos é um método crucial, uma estratégia para reduzir os efeitos do estresse abiótico (Basu *et al.*, 2021).

Bioestimulantes microbianos promotores de crescimento, formam um subgrupo da família de bioestimulantes e têm atraído a atenção da indústria agrícola (Parray *et al.*, 2023). Os bioestimulantes compreendem desde compostos orgânicos simples até microrganismos vivos mais complexos (Di-Sario *et al.*, 2025). Simbolizam uma alternativa inovadora na agricultura, eficientes no aprimoramento de insumos aumentando a resiliência das culturas a estresses (Brito-Lopez *et al.*, 2025).

Os microrganismos possuem características bioestimulantes e/ou protetivas (Sagar *et al.*, 2024). A aplicação pode ser feita na rizosfera das plantas, tratamento de sementes, imersão em solução ou pulverização foliar (Bittencourt *et al.*, 2023). Esses microrganismos, apresentam notável habilidade no incremento resiliente das plantas ao déficit hídrico (Mawar *et al.*, 2023). Aumentam a solubilização de minerais, decomposição de compostos orgânicos, produção de sideróforos, fixa N<sub>2</sub>, secreção de auxinas, giberelinas, substâncias polímeras extracelulares retendo umidade do solo, auxilia a fotossíntese, melhora morfologia e fisiologia das plantas (Ilyas *et al.*, 2020).

As espécies *A. brasilense* e *B. subtilis*, têm atraído interesse científico devido ao

seu potencial biofertilizantes e promotores de crescimento vegetal, aumentando a produtividade agrícola, melhorando a saúde das plantas e do solo (Aijaz *et al.*, 2024), aumentando a tolerância das plantas ao estresse abiótico entre eles, a salinidade e a toxicidade, em culturas como milho, trigo e arroz (Zaheer *et al.*, 2022). Enquanto o *B. subtilis*, promove a formação de esporos e desenvolvimento vegetal através de enzimas surfactantes e antibióticos benéficos (Schwab *et al.*, 2023). Inoculantes á base de *B. aryabhattai* têm ganhado relevância na agricultura, colonizando raízes de soja e estimulando o crescimento produzindo fitormônios, melhorando a absorção de nutrientes, manutenção da clorofila e regulação de genes relacionados ao crescimento, beneficiando culturas como arroz e soja (Mun *et al.*, 2024).

Estudos guiados pelo genoma forneceram informações cruciais sobre o potencial de promoção de desenvolvimento vegetal de várias Rizobactérias promotoras de crescimento de plantas (PGPR). Entre elas, as cepas de *B. aryabhattai* são fisiologicamente versáteis em suas atividades, sabe-se que cepas de PGPR produzem hormônios como Ácido indolacético (AIA), Ácido abscísico (ABA), Ácido jasmônico (JA), Giberelinas (Gas) e citocinina em culturas acumulando polihidroxialcanoatos de cadeia curta (Bhattacharyya *et al.*, 2017).

A coinoculação com múltiplas cepas bacterianas, promove efeitos sinérgicos no crescimento das plantas e na tolerância ao estresse (Wang *et al.*, 2024). Em estudo prévio, o teor de fósforo na massa seca foi influenciado por *B. aryabhattai*, indicando que o bioestimulante teve um impacto positivo na disponibilidade de fósforo e no acúmulo de biomassa vegetal (Torres *et al.*, 2024). Aumento significativo no teor de aminoácidos, (treonina, metionina e histidina) em plantas de grão-de-bico ocorreu após inoculação com diferentes cepas PGPR e reguladores de crescimento vegetal (Khan *et al.*, 2019).

Com isso, o objetivo do presente estudo foi avaliar ao longo de duas safras agrícolas ( 2023/2024 e 2024/2025), os efeitos da combinação de diferentes lâminas de irrigação e quatro tratamentos de sementes, utilizando bioestimulantes promotores de crescimento, sobre características reprodutivas na cultura da soja.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado na Universidade Estadual de Maringá, (UEM) Câmpus regional de Umuarama, Estado do Paraná. A área experimental está situada nas coordenadas 23°47' de Latitude Sul, 53°15' de Longitude Oeste e 401 metros de altitude.

De acordo com a classificação de Köppen (Peel; Finlayson e McMahon, 2007), o clima da região é do tipo subtropical úmido mesotérmico (Cfa), com meses quentes de verão e raras geadas de inverno, com tendência à concentração de chuvas no verão, porém sem apresentar estação seca definida, onde a média de temperatura dos meses mais quentes é superior a 22°C e dos meses mais frios é inferior a 18°C, com índices pluviométricos alcançando média anual de 1.500 mm ano<sup>-1</sup>.

## 2.1 Caracterização da área

A área experimental possui solo classificado como Latossolo Vermelho Distrófico, conforme Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2018). A caracterização química inicial está apresentada na Tabela 1. A caracterização foi realizada por meio de coletas de amostras de solo nas profundidades de 0-20, 20-40 e 40-60 cm. Foi realizada a aplicação de calcário, para suprir a necessidade de calagem, na profundidade de 0-20 cm elevando a saturação por bases a 70%, considerando o Poder relativo de neutralização total (PRNT) de 78%, foi de 920 kg·ha<sup>-1</sup>.

**Tabela 1.** Caracterização química do solo da área experimental.

| Prof. (cm) | pH                | P                   | M.O.               | Ca   | K    | Mg                     | B    | Al   | CTC  | V     |
|------------|-------------------|---------------------|--------------------|------|------|------------------------|------|------|------|-------|
|            | CaCl <sub>2</sub> | mg dm <sup>-3</sup> | g dm <sup>-3</sup> |      |      | cmolc dm <sup>-3</sup> |      |      |      | %     |
| 0-20       | 6,01              | 20,57               | 16,74              | 3,12 | 0,23 | 0,56                   | 0,31 | 0,10 | 4,03 | 57,88 |
| 20-40      | 5,92              | 14,62               | 15,58              | 3,85 | 0,20 | 0,43                   | 0,57 | 0,08 | 4,57 | 59,31 |
| 40-60      | 4,79              | 6,66                | 11,16              | 1,82 | 0,15 | 0,30                   | 0,92 | 0,32 | 2,60 | 34,75 |

P e K extraídos com HCl 0,05 mol L<sup>-1</sup> + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,025 mol L<sup>-1</sup>; Matéria Orgânica extraída pelo método de Walkey; Black (1934) Ca, Mg e Al extraídos com KCl 1mol L<sup>-1</sup>.

As propriedades físicas do solo foram determinadas por análises granulométricas, determinadas pela metodologia proposta por (Bouyoucos, 1951). A densidade de partículas utilizou o método balão volumétrico e densidade do solo determinada pelo método da proveta, os quais são recomendados pela (EMBRAPA 1997). A porosidade total foi calculada pelo valor da umidade volumétrica na tensão de 0,1 kPa. A microporosidade foi considerada igual ao teor de água retido na tensão de 4,0 kPa e a macroporosidade foi obtida entre a diferença da porosidade total e a microporosidade. A caracterização físico-hídrica do solo encontrado na área experimental está apresentada na Tabela 2 foi obtida com o auxílio da curva de retenção

de água no solo.

**Tabela 2.** Caracterização física e hídrica do solo da área experimental.

| UCC                              | Uc                               | CAD   | Porosidade (%) |       |       | ds                 | dp                 | Granulometria (%) |       |        |
|----------------------------------|----------------------------------|-------|----------------|-------|-------|--------------------|--------------------|-------------------|-------|--------|
| cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> | cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> | (mm)  | Micro          | Macro | Total | g cm <sup>-3</sup> | g cm <sup>-3</sup> | Areia             | Silte | Argila |
| 0,258                            | 0,135                            | 21,80 | 26,70          | 26,10 | 52,80 | 1,31               | 2,65               | 83,25             | 2,70  | 13,55  |

\*UCC – Umidade na capacidade de campo; UC – Umidade crítica; ds – densidade do solo (método de Bouyoucos, 1951); dp – densidade das partículas (método do balão volumétrico).

## 2.2 Tratamentos e delineamento experimental

Os tratamentos constituíram na aplicação de cinco lâminas de irrigação 0, 50, 75, 100 e 125% da Evapotranspiração da cultura (ET<sub>c</sub>) e tratamento de sementes de soja com quatro inoculantes, sendo: tratamento 1. Rhizotrop 2<sup>®</sup>, tratamento 2. Rhizotrop 2<sup>®</sup> + SolubPhos<sup>®</sup>, tratamento 3. Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Azotrop<sup>®</sup>; tratamento 4. Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Auras<sup>®</sup>. Os tratamentos possibilitaram arranjo fatorial 5 × 4 em blocos casualizados, com três blocos.

O experimento foi conduzido em dois anos agrícolas consecutivos, a safra 2023/2024 foi realizada no período de 25 de novembro de 2023 a 28 de fevereiro de 2024 e 2024/2025 no período de 06 de dezembro de 2024 a 28 fevereiro de 2025, adotando-se o mesmo delineamento experimental, mesmos tratamentos, cultivar e os mesmos procedimentos de implantação, manejo e colheita, permitindo comparações interanuais e avaliação da interação entre tratamentos e condições ambientais.

A evapotranspiração da cultura foi obtida conforme método proposto no boletim FAO 56 (Allen *et al.*, 1998), com obtenção da Evapotranspiração de Referência (ET<sub>o</sub>) com metodologia adaptada do método de Penman-Monteith, conforme apresentado na Equação (1) coeficientes de cultura adotados na Tabela 3. Eguacao de Penman-Monteith

$$ET_o = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T_a + 273} \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2)}$$

Eq. (1) em que:

S é a tangente a curva de pressão de saturação de vapor no ar; R<sub>n</sub> é o saldo de radiação, em MJ·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>;  
G é o fluxo de calor no solo, em MJ·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>;  
T<sub>a</sub> é a temperatura média do ar, em °C;  
u<sub>2</sub> é a velocidade do vento a 2 m, em m s<sup>-1</sup>;

es-ea é o déficit de pressão de vapor, em kPa e;  $\gamma$  é a constante psicrométrica.

**Tabela 3.** Valores de coeficiente de cultivo da soja

|     |      |      |      |      |      |      |
|-----|------|------|------|------|------|------|
| DAE | 20   | 40   | 60   | 80   | 100  | 120  |
| Kc  | 0,56 | 0,90 | 1,15 | 1,25 | 1,15 | 0,53 |

DAE – Dias Após Emergência; Kc – coeficiente de cultivo. Adaptado: FAO 56 (Allen *et al.*, 1998).

A cultivar de soja utilizada foi a Brasmax Fibra IPRO, semeado em espaçamento entre linhas de 0,45 m com 10 sementes por metro, resultando em uma população estimada em 220 mil plantas ha<sup>-1</sup>.

Os dados meteorológicos foram obtidos por meio de uma estação meteorológica automática instalada ao lado da área experimental. A estação realiza leituras de temperatura máxima, média e mínima, umidade relativa máxima, média e mínima, radiação solar global, pressão atmosférica, velocidade e direção do vento com armazenamento dos dados a cada 15 e 60 minutos e 24 horas. Com os dados meteorológicos, a estação foi programada para calcular e armazenar os dados de déficit de pressão de vapor (DPV) e a evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>).

No momento do plantio, as sementes foram tratadas em sacos plásticos visando maior homogeneização do produto, em seguida, transportadas ao campo em caixas de isopor. Os inoculantes utilizados de diferentes marcas comerciais foram: Rhizotrop 2<sup>®</sup>, CEPA: SEMIA 5080/5079 *B. japonicum* concentração de 5x10<sup>9</sup> UFC/g com a dose de 1.5 g para cada quilograma de sementes de soja, SolubPhos<sup>®</sup> Simbiose contendo a composição das seguintes CEPA: CNPMS B2084 BRM 034840 *B. subtilis*, CEPA CNPMS B119 BRM033112 *B. megaterium* com a concentração de 4x10<sup>9</sup> Células viáveis/ml com a dose de 2 mL/quilograma de sementes de soja, Azotrop<sup>®</sup> contendo a CEPA: Ab-V5 e Ab-V6 *A. brasilense* na concentração de 2 × 10<sup>8</sup> UFC/mL e dose 2ml/quilograma de sementes de soja e por fim, Auras<sup>®</sup> CEPA: CMAA1363 *B. aryabhatai* concentração 1x10<sup>8</sup> UFC/ml com a dose de 4ml/quilograma sementes soja.

### 2.3 Manejo da irrigação

O manejo da irrigação foi realizado via solo, por meio da instalação de tensiômetros nas profundidades de 0,3 m. As leituras dos tensiômetros foram realizadas

utilizando-se um tensímetro digital, em um intervalo de 2 dias e, a partir do potencial mátrico ( $\psi_m$ ) médio de cada tratamento, calculou-se a lâmina necessária para elevar a umidade do solo à capacidade de campo.

A partir das leituras dos tensiômetros, a umidade do solo foi estimada por meio da equação de Van Genuchten (1980) Equação (2), com os parâmetros apresentados na Tabela 4. Os parâmetros de ajuste do modelo foram determinados por meio do software RETC, desenvolvido pelo US Salinity Laboratory – USDA (Van Genuchten; Leij e Yates 1991), utilizando os pares de dados obtidos na curva de retenção de água no solo.

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\left[1 + (\alpha |\psi_m|)^n\right]^m} \quad \text{Eq. (2)}$$

em que:

$\theta$  ( $\psi_m$ ) – umidade volumétrica em função do potencial mátrico, em  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ;

$\theta_r$  – umidade volumétrica residual do solo, em  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ;

$\theta_s$  – umidade volumétrica do solo saturado, em  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ;

$m$  e  $n$  – parâmetros de regressão da equação, adimensionais;

$\alpha$  – parâmetro com dimensão igual ao inverso da tensão, em  $\text{kPa}^{-1}$ ; e  $\psi_m$  – potencial mátrico, em kPa.

**Tabela 4.** Valores de umidade de saturação ( $\theta_s$ ) e residual ( $\theta_r$ ) e dos parâmetros empíricos ( $\alpha$ ,  $n$  e  $m$ ) do modelo de Van Genuchten (1980).

| Camada (cm) | $\theta_s$ ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) | $\theta_r$ ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) | $\alpha$ ( $\text{kPa}^{-1}$ ) | $n$   | $M$   |
|-------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------|-------|-------|
| 0-30        | 0,356                                     | 0,161                                     | 0,319                          | 1,539 | 0,350 |

O experimento foi irrigado adotando-se o sistema de irrigação por aspersão convencional, com a utilização de aspersores operando na pressão de 20 mca, vazão de  $1,07 \text{ m}^3 \text{h}^{-1}$ , espaçados de  $12 \times 12 \text{ m}$  com intensidade de aplicação de  $7,43 \text{ mm h}^{-1}$ . Os ajustes de tempo para cada tratamento eram feitos de forma proporcional à reposição de água requerida.

## 2.4 Variáveis analisadas

Foram avaliadas variáveis de desenvolvimento e componentes de produção da

soja, incluindo número de plantas em dois metros lineares no centro da parcela (NP2M), diâmetro do caule (DC), altura de plantas (ALT), número de nós (NN), número total de vagens (NV), distribuição das vagens segundo número de grãos por vagem (0G, 1G, 2G, 3G e 4G), número de grãos por planta (GP), razão entre o número de grãos e o número de vagens (G/V), massa de mil grãos (MMG), população final (POP) e produtividade (PROD), esta ajustada para 13% de umidade.

## 2.5 Análise dos dados

Inicialmente os dados coletados foram verificados no sentido de retirar, por meio de teste de outliers e inspeção gráfica (boxplot e quantile - quantile), valores discrepantes e inconsistências. Posteriormente, foram verificadas as suposições estatísticas dos efeitos principais serem aditivos, os erros independentes e distribuídos normalmente e as variâncias homogêneas. Os parâmetros avaliados foram então submetidos ao teste de normalidade, por meio do teste de Shapiro-Wilk, e teste de homogeneidade, por meio do teste de Levene. Caso fosse verificado que um dos pressupostos não foi atendido ( $p < 0,05$ ), adotou-se a transformação Box-Cox, cujo parâmetro  $\lambda$  foi estimado por máxima verossimilhança.

Após o ajuste das variáveis respostas, os dados de produtividade foram analisados estatisticamente por meio da análise de variância aplicando o teste F e desdobrando as análises sempre que a interação fosse significativa. Na ausência de interação significativa, as médias do fator qualitativo (inoculantes) foram comparadas por meio do Teste de Scott-Knott, em nível de 5% de probabilidade e, os fatores quantitativos (lâminas de irrigação) foram analisados estatisticamente por meio de regressão polinomial, em nível de 5% de probabilidade, com ajustes de modelos para cada ano avaliado.

Além da análise univariada tradicional realizada para a produtividade, foram realizadas análises multivariadas com todas as variáveis respostas coletadas na condução de dois anos experimentais. As variáveis foram analisadas por Escala Multidimensional Não Métrica (NMDS), técnica de ordenação baseada em distância, para avaliar agrupamentos entre anos, lâminas e inoculantes, utilizando distância de Bray-Curtis.

A similaridade entre os anos foi quantificada por meio da análise Procrustes entre as configurações obtidas por Análise de Componentes Principais (PCA) dos dados médios de cada ano, seguida do teste Protest com 999 permutações para avaliar a significância da

correspondência entre conjuntos multivariados.

A interação entre tratamentos e anos de avaliação foi realizada ajustando-se modelo GGE-Biplot, considerando os anos como ambientes e as combinações lâmina  $\times$  inoculante como “genótipos”, utilizando o pacote *metan*. Foram gerados os gráficos *which-won-where*, média  $\times$  estabilidade e relações entre ambientes. Estatísticas descritivas considerando média, desvio-padrão, coeficiente de variação, assimetria e curtose foram calculadas para cada combinação de ano  $\times$  lâmina e ano  $\times$  inoculante.

Complementarmente, índices de tamanho de efeito ( $\eta^2$  parcial,  $\omega^2$  e  $d$  de Cohen) foram estimados para cada fator e interação, permitindo quantificar a magnitude de cada fonte de variação além da significância estatística.

A estrutura de correlação entre variáveis foi avaliada separadamente para cada ano por meio de mapas de calor baseados na matriz de correlação de Pearson, utilizando distância euclidiana e método de ligação completa. Essa análise permitiu identificar alterações das variáveis entre as safras 2023/2024 e 2024/2025.

Para as análises multivariadas, as duas safras foram consideradas explicitamente como um terceiro fator, representando ambientes contrastantes. Assim, o conjunto de dados foi estruturado como um fatorial  $2 \times 5 \times 4$  (Saфра  $\times$  Lâmina  $\times$  Inoculante), permitindo avaliar efeitos principais e interações no espaço multivariado. As análises NMDS, Procrustes e GGE-Biplot foram realizadas usando todas as variáveis simultaneamente, considerando as safras como ambientes independentes.

As análises estatísticas foram conduzidas no ambiente R (versão 4.5.0). A triagem de outliers, testes de pressuposições, transformações Box-Cox e análises univariadas foram realizadas utilizando os pacotes tidyverse, car, rstatix e EnvStats. As análises multivariadas foram conduzidas com os pacotes vegan (NMDS, Procrustes e Protest) e metan (GGE-Biplot). As estatísticas descritivas foram geradas com o pacote moments e dplyr, enquanto os mapas de calor foram produzidos com o pacote pheatmap. As figuras foram elaboradas utilizando os pacotes ggplot2 e ggrepel.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 1 estão apresentados os dados meteorológicos coletados ao longo da condução do experimento nas safras de 2023/2024 e 2024/2025.

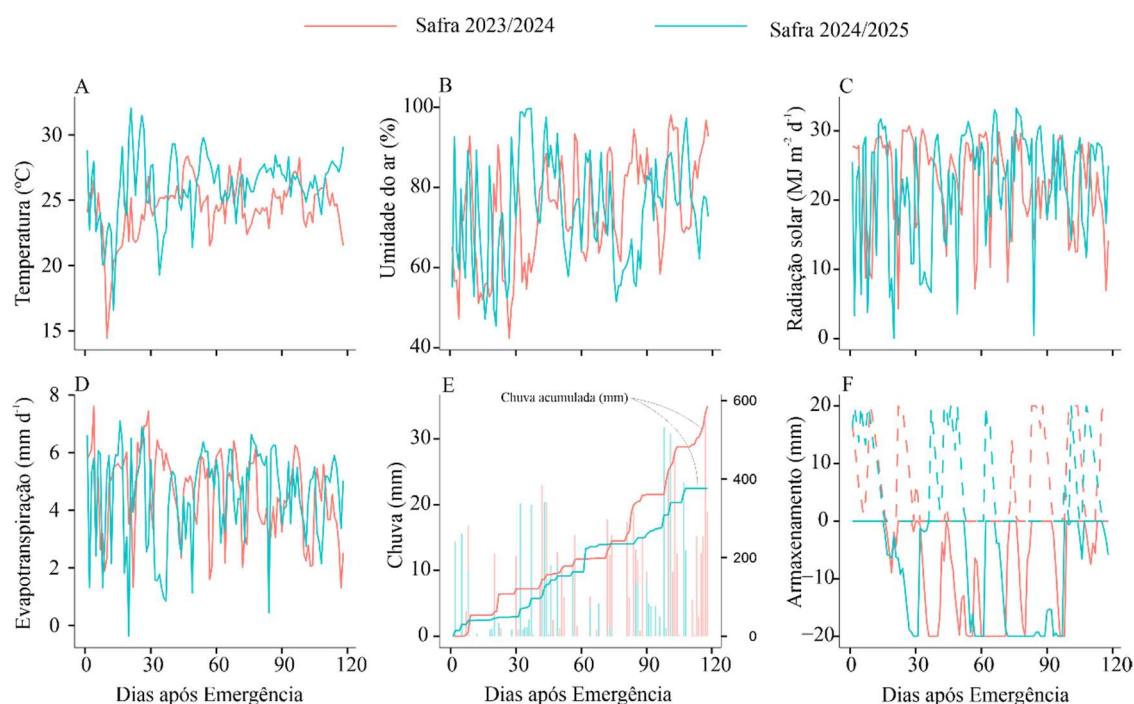


**Figura 1.** Painele climático das safras 2023/24 e 2024/25 com dados de temperatura média diária (A); umidade relativa do ar (B); radiação global (C); evapotranspiração de referência (D); chuva diária e chuva acumulada (E) e; armazenamento de água no solo (F).

A temperatura média variou entre 20 a 28°C, com apenas um dia em cada safra com temperaturas abaixo ou acima desses valores (Figura 1A). O comportamento da temperatura ao longo das duas safras é considerado ideal para germinação, crescimento vegetativo e enchimento de grãos de soja (Ding *et al.*, 2024; Yang *et al.*, 2023; Szczrba *et al.*, 2021). Até os 30 dias após emergência (DAE) foram verificadas temperaturas superiores a 30°C, ultrapassando os limites críticos. Isso se repetiu por apenas dois dias na safra 024/2025 o que, e acordo com Herritt e Frittschi (2020) seriam necessários sete dias de calor intenso para que a taxa da fotossíntese começar a diminuir, sob condições contínuas de 38 a 45°C, variando conforme o genótipo.

Na Figura 1E, o acumulado de chuva foi de 586 e 375 mm para as safras 2023/24 e 2024/25, respectivamente. Esses valores se encontram dentro do recomendado para a cultura da soja (Machado *et al.*, 2023) no entanto, foram observadas distribuições temporais de chuvas muito intensas, o que de acordo com Tavares *et al.* (2022) se torna mais importante do que o total acumulado.

Apesar de o acumulado de chuva na safra 2023/24 ter sido superior quando comparado com a safra 2024/25, verificou-se distribuição irregular, além de ter sido observada maior demanda atmosférica nesse período, confirmado pelos dados de umidade

relativa do ar (Figura 1B) e radiação solar (Figura 1C). A atmosfera mais intensa resultou em maiores valores de evapotranspiração de referência (Figura 1D) na safra 2023/24, o que resultou em maior demanda hídrica da cultura e consequente balanço hídrico (Figura 1F) com períodos de armazenamento abaixo da faixa de aproveitamento pelas plantas. Essa tendência foi confirmada por autores como Ogunkanmi *et al.* (2021), Anda *et al.* (2020) e Hamareddy *et al.* (2025).

As condições meteorológicas na safra 2023/24 resultaram em menores valores de produtividade quando comparadas com as produtividades obtidas na safra 2024/25

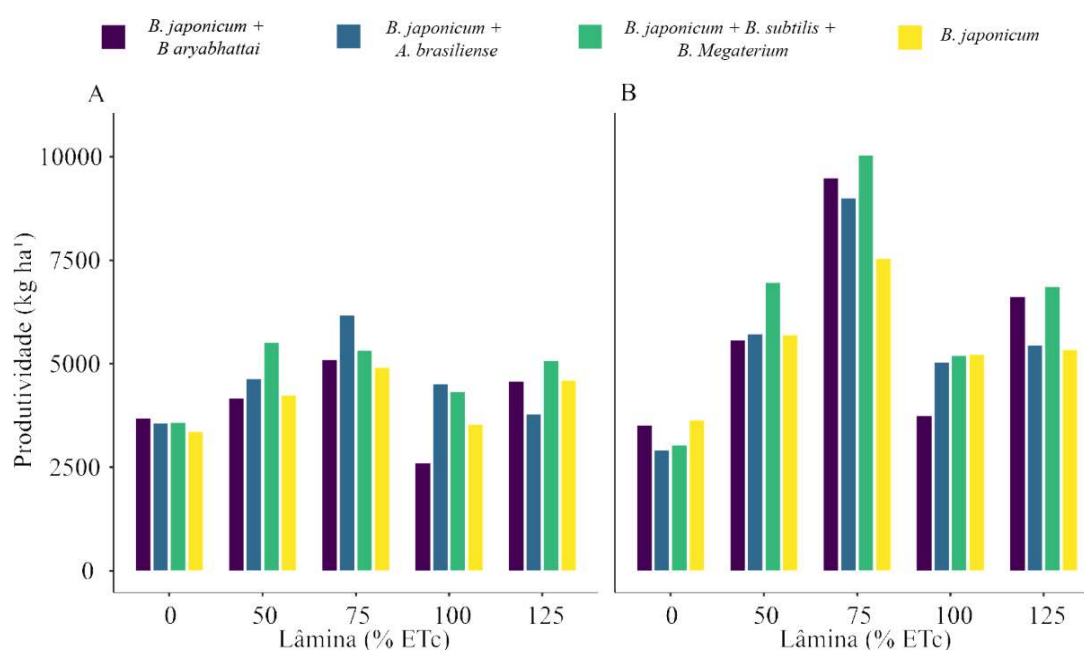


**Figura 2.** Médias de produtividade da interação lâmina × inoculante para as safras 2023/2024 (A) e 2024/2025 (B).

Independentemente do ano, a lâmina de irrigação com 75% da ETc apresentou os maiores valores de produtividade, independentemente do inoculante adotado (Figura 2). As afirmações podem ser confirmadas por meio da análise de variância por safra, revelando efeito significativo de lâmina, inoculante e interação entre esses fatores nos dois anos agrícolas, evidenciando que a resposta produtiva da soja às lâminas de irrigação depende da coinoculação microbiana adotada (Tabela 5 e Tabela 6). De acordo com Niu *et al.*, (2024) o manejo hídrico adequado altera a estrutura e função da microbiota rizosférica, favorecendo microrganismos benéficos, como fixadores de nitrogênio, aumentando funções relacionadas ao metabolismo de nitrogênio, carbono e enxofre. Em resumo e de forma antagônica, déficits hídricos podem reduzir a nodulação e a atividade nitrogenase, enquanto manejos eficientes de irrigação maximizam esses

processos (Yeremko *et al.*, 2025).

**Tabela 5.** Produtividade de grãos de soja ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) em função da interação entre lâminas de irrigação e inoculação bioestimulante na safra 2023/2024.

| Tratamentos                                                           | Lâminas (%Etc) |            |            |            |            | CV (%) |
|-----------------------------------------------------------------------|----------------|------------|------------|------------|------------|--------|
|                                                                       | 0              | 50         | 75         | 100        | 125        |        |
| <i>B. japonicum</i> +<br><i>B. aryabhattai</i>                        | 3676,65 aB     | 4168,59 bB | 5101,78 bA | 2603,59 cC | 4576,14 aA |        |
| <i>B. japonicum</i> +<br><i>A. brasiliense</i>                        | 3569,51 aC     | 4635,50 bB | 6167,76 aA | 4513,10 aB | 3788,02 bC |        |
| <i>B. japonicum</i> +<br><i>B. subtilis</i> +<br><i>B. megaterium</i> | 3585,16 aC     | 5518,31 aA | 5320,69 bA | 4319,74 aB | 5070,77 aA | 12,32  |
| <i>B. japonicum</i>                                                   | 3361,38 aC     | 4237,39 bB | 4916,98 bA | 3533,86 bC | 4593,44 aB |        |

\*Letras minúsculas comparam inoculantes dentro de cada lâmina; letras maiúsculas comparam lâminas dentro de cada inoculante, pelo teste de Scott-Knott ( $p \leq 0,05$ ).

Na safra 2023/2024 (Tabela 5), a produtividade apresentou variação de 2603 a 6.168  $\text{kg ha}^{-1}$ , com valores máximos obtidos na lâmina de 75% Etc, quando associado a *A. brasiliense* (6.167,76  $\text{kg ha}^{-1}$ ). A inoculação com *A. brasiliense* aumentou a produtividade em aproximadamente 73% quando se aumentou a lâmina de 0 para 75% da Etc, indicando forte sinergia entre aporte hídrico moderado e o potencial promotor de crescimento do inoculante. Esse aumento de produtividade da soja, é corroborado por Naoe *et al.*, (2020), que verificaram aumento de produtividade de 77,20% com coinoculação de bioestimulantes *A. brasiliense* e *B. japonicum*, mesmo tratamento.

A coinoculação de *B. subtilis* + *B. megaterium* e *B. japonicum* apresentou maiores valores de produtividade na lâmina de 50% da ETc (5.518,31  $\text{kg ha}^{-1}$ ), não se diferenciando dos valores obtidos nas lâminas de 75 e 125% da ETc, sugerindo maior estabilidade produtiva em regimes onde a irrigação suplementa déficits pontuais, sem necessidade de reposição plena ao longo de todo o ciclo. Essa afirmação é confirmada por Marinković *et al.*, (2024) que a coinoculação de *B. japonicum* com *B. subtilis* e/ou *B. megaterium* aumenta a tolerância ao déficit hídrico, com resposta mais pronunciada em condições de déficit hídrico moderado, com manutenção da produtividade mesmo quando a irrigação não é plena. Os autores, juntamente com Cheng *et al.*, (2025) e Miljakovic *et al.*, (2022) apontam que isso ocorre em virtude da ação sinérgica dos microrganismos, estimulando o sistema antioxidante, a fixação biológica de nitrogênio e a produção de fitohormônios, resultando em plantas mais resilientes ao déficit hídrico.

Na safra 2024/2025 (Tabela 6) as produtividades apresentaram variação em 2916

a 10.035 kg ha<sup>-1</sup> e o tratamento com maiores valores novamente foi a lâmina de 75% da ETc para todos os inoculantes.

**Tabela 6.** Produtividade de grãos de soja (kg ha<sup>-1</sup>) em função da interação entre lâminas de irrigação e inoculação bioestimulante na safra 2024/2025.

| Tratamentos                                                           | Lâminas (%ETc) |            |             |            |            | CV(%) |
|-----------------------------------------------------------------------|----------------|------------|-------------|------------|------------|-------|
|                                                                       | 0              | 50         | 75          | 100        | 125        |       |
| <i>B. aryabhattai</i>                                                 | 3520,77 aC     | 5565,22 bB | 9486,55 aA  | 3748,37 bC | 6619,84 aB |       |
| <i>A. brasilense</i>                                                  | 2916,47 bD     | 5722,06 bB | 9000,10 aA  | 5041,31 aB | 5452,32 bB |       |
| <i>B. japonicum</i> +<br><i>B. subtilis</i> +<br><i>B. megaterium</i> | 3041,52 bD     | 6957,63 aB | 10035,39 aA | 5197,65 aC | 6865,33 aB | 12,32 |
| <i>B. japonicum</i>                                                   | 3637,57 aC     | 5691,65 bB | 7547,05 bA  | 5229,18 aB | 5340,62 bB |       |

\*Letras minúsculas comparam inoculantes dentro de cada lâmina; letras maiúsculas comparam lâminas dentro de cada inoculante, pelo teste de Scott-Knott ( $p \leq 0,05$ ).b

Nessa safra verificou-se que a coinoculação de *B. subtilis* + *B. megaterium* e *B. japonicum* foi o tratamento que apresentou maior produtividade, com 10.035 kg ha<sup>-1</sup> em 75% da ETc, representando aumento de 230% quando comparado ao tratamento sem lâminas de irrigação (0% ETc).

Importante destacar a variação de resposta entre os anos obtidos com a inoculação com *B. aryabhattai*, o que demonstra que esse bioestimulante não é apenas responsiva ao manejo hídrico, como também se comporta com alta dependência entre irrigação e demanda evapotranspirativa. Esse padrão sugere que o uso de *B. aryabhattai* deve ser adotado junto com estratégias de irrigação que priorizem lâminas abaixo da capacidade de campo em ambientes de alta demanda evaporativa, maximizando o potencial fisiológico e bioquímico do inoculante (May *et al.*, 2021). Respostas diferentes entre anos agrícolas para esse bioestimulante também foram relatados por (Vikram *et al.*, 2022; May *et al.*, 2019).

A avaliação das safras 2023/24 e 2024/25 demonstrou diferentes respostas da produtividade da soja quando submetida às lâminas de irrigação e aos inoculantes avaliados, em virtude da variabilidade climática entre anos e efeitos específicos dos manejos dos inoculantes.

Essa afirmativa pode ser confirmada por meio da estatística descritiva apresentada na (Tabela 7), onde são apresentados a média, desvio-padrão, coeficiente de variação, variação, assimetria e curtose.

**Tabela 7.** Estatísticas descritivas da produtividade de grãos de soja nas safras 2023/24 e 2024/25, considerando as combinações entre lâminas de reposição de água e inoculantes avaliados.

| F.V                   | Ano  | Variação        | Média   | DP      | CV    | Assimetria | Curtose |
|-----------------------|------|-----------------|---------|---------|-------|------------|---------|
| 0% ETc                | 2024 | 2502.5–4750.5   | 3548.10 | 577.08  | 16.26 | 0.00       | 2.18    |
| 0% ETc                | 2025 | 1570.8–4867.3   | 3279.00 | 750.40  | 22.88 | -0.11      | 2.55    |
| 50% ETc               | 2024 | 3225.6–10119.4  | 4639.90 | 1384.73 | 29.84 | 2.77       | 11.02   |
| 50% ETc               | 2025 | 4345.6–10398.0  | 5984.10 | 1099.24 | 18.37 | 2.19       | 9.39    |
| 75% ETc               | 2024 | 3893.0–7800.8   | 5376.80 | 1088.40 | 20.24 | 0.58       | 2.25    |
| 75% ETc               | 2025 | 6414.6–13642.1  | 9017.27 | 1683.47 | 18.67 | 0.55       | 2.86    |
| 100% ETc              | 2024 | 1567.6–6311.4   | 3742.57 | 968.93  | 25.89 | -0.20      | 3.23    |
| 100% ETc              | 2025 | 2284.8–6941.0   | 4804.13 | 1016.56 | 21.16 | -0.44      | 2.93    |
| 125% ETc              | 2024 | 3149.1–6758.2   | 4507.09 | 869.25  | 19.29 | 0.59       | 2.86    |
| 125% ETc              | 2025 | 4131–8696.96    | 6069.53 | 1122.40 | 18.49 | 0.27       | 2.42    |
| <i>B. aryabhattai</i> | 2024 | 1567.6–7411.75  | 4025.35 | 1110.31 | 27.58 | 0.27       | 3.67    |
| <i>B. aryabhattai</i> | 2025 | 2284.8–11890.24 | 5788.15 | 2418.68 | 41.79 | 0.81       | 2.88    |
| <i>A. brasilense</i>  | 2024 | 2548.9–7487.37  | 4534.78 | 1137.57 | 25.09 | 0.87       | 3.33    |
| <i>A. brasilense</i>  | 2025 | 1570.8–11513.9  | 5626.45 | 2091.97 | 37.18 | 0.60       | 3.46    |
| <i>B. subtilis</i>    | 2024 | 2961.6–10119.4  | 4762.93 | 1463.81 | 30.73 | 1.89       | 6.98    |
| <i>B. subtilis</i>    | 2025 | 2188.8–13642.1  | 6419.50 | 2582.81 | 40.23 | 0.55       | 3.03    |
| <i>B. japonicum</i>   | 2024 | 2282.4–6974.9   | 4128.61 | 906.07  | 21.95 | 0.30       | 3.52    |
| <i>B. japonicum</i>   | 2025 | 2211.0–9613.6   | 5489.21 | 1601.18 | 29.17 | 0.18       | 2.78    |

FV – Fonte de variação; DP – Desvio Padrão; CV – Coeficiente de Variação; Etc – evapotranspiração.

Por meio da Tabela 7, fica evidente a heterogeneidade nas distribuições de produtividade, especialmente nas lâminas de 50% e 75% da ETc, caracterizadas por amplitudes elevadas e coeficientes de variação superiores a 20%, indicando sensibilidade elevada das plantas a pequenas variações no suprimento hídrico nesses níveis. A curtose elevada, principalmente na lâmina de 50% da ETc (valores de :2024 igual a 11.02; 2025 igual a 9.39), sugere a ocorrência de valores extremos positivos, reforçando o caráter altamente responsivo da soja a condições subótimas, porém ainda não limitantes, de disponibilidade de água no solo.

Na comparação entre as safras, os resultados descritivos também revelam que a safra 2024/25 apresentou maior média de produtividade, como também maior variabilidade, principalmente para o inoculante *B. aryabhattai*, que apresentou CV de 41.79%. Este comportamento é coerente com o regime pluviométrico mais irregular e com maior amplitude térmica registrado em 2025, o qual, embora tenha beneficiado determinados tratamentos, como as lâminas de 50 e 75% ETc, também resultou em maior

variabilidade entre os tratamentos.

A análise de variância da produtividade para as safras 2023/24 e 2024/25 está apresentada na Tabela 8. A tabela apresenta graus de liberdade (GL), soma de quadrados (SQ), quadrado médio (QM), valor de F e significância estatística (p), indicando a contribuição relativa de cada fator e interação para a variabilidade total observada.

**Tabela 8.** Análise de variância, considerando os efeitos nas safras 2023/24 e 2024/25 de lâmina de irrigação, inoculante e suas interações sobre a produtividade de grãos de soja.

| FV                       | GL  | SQ       | MQ       | F_valor  | p_valor  | Perc. SQ |
|--------------------------|-----|----------|----------|----------|----------|----------|
| Ano (A)                  | 1   | 2.59E+08 | 2.59E+08 | 283.47   | 1.85E-49 | 14.50511 |
| Lâmina de irrigação (LI) | 4   | 7.68E+08 | 1.92E+08 | 210.6286 | 8.9E-101 | 43.11013 |
| Inoculante (I)           | 3   | 43645238 | 14548413 | 15.9497  | 7.34E-10 | 2.448363 |
| A × LI                   | 4   | 1.9E+08  | 47559404 | 52.14028 | 6.11E-36 | 10.67174 |
| A × I                    | 3   | 8268633  | 2756211  | 3.021687 | 0.029516 | 0.463845 |
| LI × I                   | 12  | 86182599 | 7181883  | 7.873636 | 2.29E-13 | 4.834578 |
| A × LI × I               | 12  | 25886111 | 2157176  | 2.364953 | 0.005893 | 1.452131 |
| Resíduos                 | 440 | 4.01E+08 | 912143.2 | -        | -        | 22.5141  |

FV - Fonte de variação; GL - Graus de Liberdade; SQ - Soma dos Quadrados; MQ - Média dos Quadrados; F\_valor - Razão da variância; P\_valor - Significancia; Perc. SQ - Porcentagem da soma de quadrados (%).

É possível verificar que a lâmina responde por 43,1% da soma de quadrados total, reafirmando-se como o fator isolado de maior importância para a produtividade, sendo seguida pela interação Ano × Lâmina (10,67%), que evidencia que o regime hídrico não exerce efeito uniforme entre safras.

A interação significativa entre Lâmina × Inoculante (4,83%) reforça que os benefícios dos microrganismos inoculados não são lineares nem constantes, mas dependem fortemente da disponibilidade hídrica no solo. Estudos mostram que a respostas das plantas e da microbiota do solo à inoculação microbiana é fortemente dependente da quantidade de água disponível e, em condições de déficit hídrico, os efeitos dos inoculantes podem ser reduzidos ou alterados (Liu *et al.*, 2023; Cirillo *et al.*, 2023; Liu *et al.*, 2024).

Como confirmação do que foi discutido acima, na Tabela 9. estão apresentados o tamanho de efeito dos fatores e interações do modelo fatorial, estimado pelos coeficientes  $\eta^2$ ,  $\eta^2$  parcial e  $\omega^2$ . Os intervalos de confiança (95%) são apresentados entre colchetes. Esses indicadores quantificam a magnitude real da contribuição de cada termo do modelo permitindo identificar quais fatores exerceram maior influência prática sobre a

produtividade e fornecendo suporte adicional para a interpretação das análises multivariadas subsequentes.

Dessa forma,  $\eta^2$  quantifica a fração da variância total explicada pelo fator;  $\eta^2$  parcial isola o efeito do fator considerando apenas sua variância e o erro, sendo adequado em modelos multifatoriais e  $\omega^2$  parcial é uma métrica mais robusta e menos tendenciosa, estimando o tamanho do efeito na população, sendo recomendada para interpretação comparativa.

**Tabela 9.** Tamanho de efeito dos fatores e interações do modelo fatorial, estimado pelos coeficientes  $\eta^2$ , parcial  $\eta^2$  e  $\omega^2$ .

| FV                       | $\eta^2$ | 95% CI      | Parcial $\eta^2$ | 95% CI      | $\omega^2$ Parcial | 95% CI      |
|--------------------------|----------|-------------|------------------|-------------|--------------------|-------------|
| Ano (A)                  | 0.15     | [0.10–1.00] | 0.39             | [0.34–1.00] | 0.37               | [0.31–1.00] |
| Lâmina de irrigação (LI) | 0.43     | [0.37–1.00] | 0.66             | [0.62–1.00] | 0.64               | [0.59–1.00] |
| Inoculante (I)           | 0.02     | [0.00–1.00] | 0.10             | [0.05–1.00] | 0.09               | [0.04–1.00] |
| A $\times$ LI            | 0.11     | [0.06–1.00] | 0.32             | [0.26–1.00] | 0.30               | [0.24–1.00] |
| A $\times$ I             | 0.0046   | [0.00–1.00] | 0.02             | [0.00–1.00] | 0.01               | [0.00–1.00] |
| LI $\times$ I            | 0.05     | [0.00–1.00] | 0.18             | [0.11–1.00] | 0.15               | [0.08–1.00] |
| A $\times$ LI $\times$ I | 0.01     | [0.00–1.00] | 0.06             | [0.01–1.00] | 0.03               | [0.00–1.00] |

FV - Fonte de variação;  $\eta^2$  - Eta ao quadrado; Parcial  $\eta^2$  - Eta ao quadrado parcial;  $\omega^2$  Parcial - Omega ao quadrado parcial; 95% CI - Intervalo de confiança de 95%.

Os coeficientes  $\eta^2$  parcial e  $\omega^2$  parcial apontam que a lâmina explica 66% da variação particionada ( $\eta^2$  parcial) e 64% da variância populacional estimada ( $\omega^2$ ), caracterizando-a como um fator de grande magnitude e consistente entre anos. O efeito de Ano deve-se também ser levado em consideração ( $\eta^2$  parcial = 0.39), corroborando com as diferenças meteorológicas observadas entre as safras 2023/24 e 2024/25. Já o efeito dos inoculantes é moderado ( $\eta^2$  parcial = 0.10), porém relevante, indicando capacidade biológica de promoção de crescimento.

No entanto, seu efeito é significativamente influenciado pelas lâminas, como evidenciado pelo efeito da interação LI  $\times$  I ( $\eta^2$  parcial = 0.18). A significativa interação tripla (A  $\times$  LI  $\times$  I) reforça que a resposta combinada dos fatores é dependente do ambiente, justificando a abordagem multivariada aplicada na continuidade desta discussão.

Até este ponto, as análises univariadas e descritivas demonstraram que tanto as lâminas de irrigação quanto os inoculantes influenciam significativamente a produtividade, porém com forte influência do ambiente entre as safras 2023/24 e 2024/25.

A variabilidade climática registrada (Figura 1), bem como as diferenças de resposta produtiva entre lâminas e inoculantes (Figuras 2A e 2B; Tabelas 4, 5 e 6),

indicam que o comportamento da cultura resulta de interações complexas, envolvendo fatores fisiológicos, microbianos e hídricos atuando simultaneamente. Dentro desse contexto, análises unidimensionais são insuficientes para capturar a estrutura global das respostas da soja, pois cada variável isolada representa apenas uma fração da resposta integrada da planta aos tratamentos e ao ambiente (Schwalbert *et al.*, 2020). Dessa forma, torna-se necessária a utilização de técnicas multivariadas capazes de sintetizar padrões emergentes e dependências entre múltiplos atributos avaliados ao longo das duas safras.

As análises multivariadas (NMDS, Procrustes e GGE-Biplot) foram realizadas utilizando simultaneamente todas as variáveis agronômicas mensuradas ao longo do experimento, incluindo componentes de crescimento, distribuição de vagens, número de grãos por planta, massa de mil grãos, população final e produtividade. Assim, os agrupamentos observados não refletem apenas o comportamento de uma variável isolada, mas sim a estrutura multivariada completa do sistema solo-planta-atmosfera. Essa abordagem permite avaliar como os tratamentos e os anos agrícolas influenciam o conjunto integrado de respostas fisiológicas da soja, fornecendo uma visão mais abrangente do desempenho dos inoculantes e das lâminas de irrigação.

Na Figura 3 está apresentada a análise de ordenação por Escalonamento Multidimensional Não Métrico (NMDS) aplicada ao conjunto completo de variáveis avaliadas nas safras 2023/24 e 2024/25.

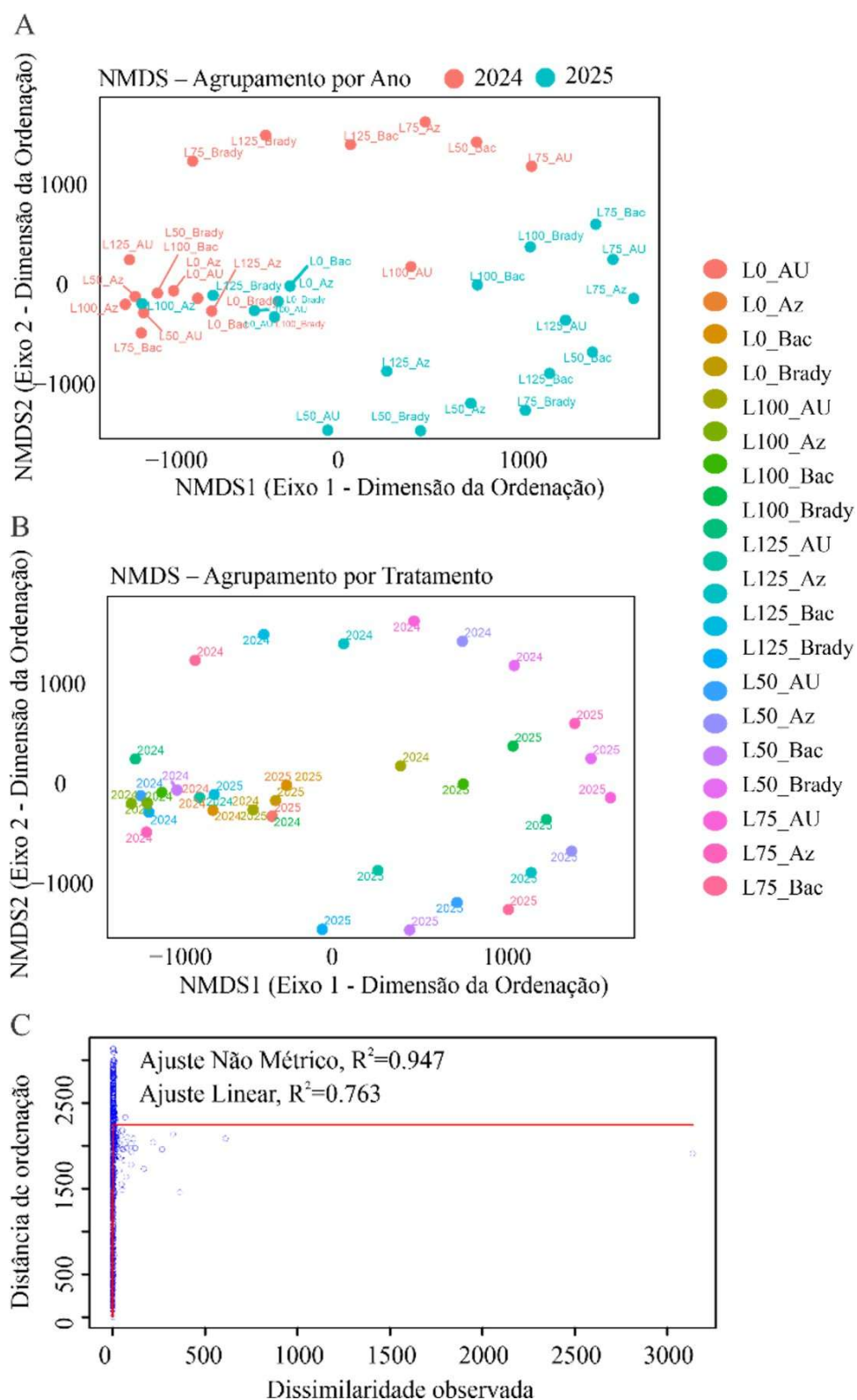


**Figura 3.** Ordenação NMDS baseada em todas as variáveis avaliadas no experimento. (A) Agrupamento por ano agrícola. (B) Agrupamento por tratamento. (C) Stressplot mostrando excelente qualidade de ajuste ( $R^2$  não-métrico = 0,947). Cada ponto representa todas as variáveis de uma parcela experimental. Brady - *B. japonicum*, Bac - *B. japonicum* + *B. subtilis* + *B. megaterium*, Az - *B. japonicum* + *A. Brasilense*, Au - *B. japonicum* + *B. aryabhattai*.

Ao se analisar a estrutura multivariada entre as safras 2023/24 e 2024/25 (Figura 3A) ao longo do eixo NMDS1, indicando forte efeito do ano agrícola sobre o conjunto multivariado das variáveis analisadas. As observações na safra 2023/24 concentraram-se majoritariamente no quadrante esquerdo, enquanto as observações da safra 2024/25 se posicionaram no quadrante direito, formando dois agrupamentos bem definidos.

Tal divergência multivariada é consistente com o quadro climático previamente apresentado (Figura 1), no qual a safra 2023/24 foi caracterizada por maior demanda atmosférica, irregularidade pluviométrica e períodos de déficit hídrico mais prolongados. Esses fatores afetaram simultaneamente a variáveis de desenvolvimento e componentes produtivos, resultando em perfis multivariados distintos entre as safras, ou seja, ficou evidenciado que as variações climáticas são os principais fatores estruturante da similaridade multivariada em sistemas agrícolas, assim como observado em estudos realizados por (Ray *et al.*, 2015; Vogel *et al.*, 2019; Liu *et al.*, 2021).

Ao ser analisada a (Figura 3B) percebe-se que os tratamentos apresentam com padrões consistentes dentro de cada ano, com sobreposição entre inoculantes e lâminas nas regiões centrais da ordenação. Esse comportamento indica que, apesar da forte influência do ambiente, as respostas aos tratamentos apresentam grau de estabilidade.

Apesar da estabilidade quando se avalia todos os tratamentos, é importante mencionar que foi observada maior dispersão nos tratamentos com lâminas de 75% e 125% da ETc, indica aumento da plasticidade fisiológica da soja, ou seja, maior capacidade da planta em ajustar seu funcionamento interno (crescimento, nodulação e assimilação de recursos) em resposta às variações ambientais e aos diferentes inoculantes. Em situações de condições hídrica próximas do ideal, processos fisiológicos tornam-se mais dinâmicos, permitindo maior expressão das diferenças entre tratamentos, o que explica a ampliação da variabilidade multivariada nesses níveis de reposição de água (DA-Silva *et al.*, 2022; Tavares *et al.*, 2023; Tavares *et al.*, 2025).

Na Figura 3C está apresentado o gráfico de diagnóstico que mostra o quanto o NMDS conseguiu representar adequadamente as distâncias reais entre as unidades amostrais, o stressplot. O stressplot apresentou  $R^2$  não-métrico = 0.947, indicando excelente correspondência entre distâncias observadas e distâncias da ordenação. Esse valor, associado ao comportamento concentrado dos pontos próximos ao eixo y e ao bom desempenho do ajuste linear ( $R^2$  = 0.763), assegura que a ordenação preservou adequadamente as relações de similaridade entre as parcelas.

A estabilidade temporal das respostas multivariadas entre as safras 2023/24 e

2024/25 pode ser visualizada na análise Procrustes (Figura 4), a qual compara diretamente as ordenações dos dois anos (A) e mostra o deslocamento individual de cada tratamento ao longo do tempo (B).

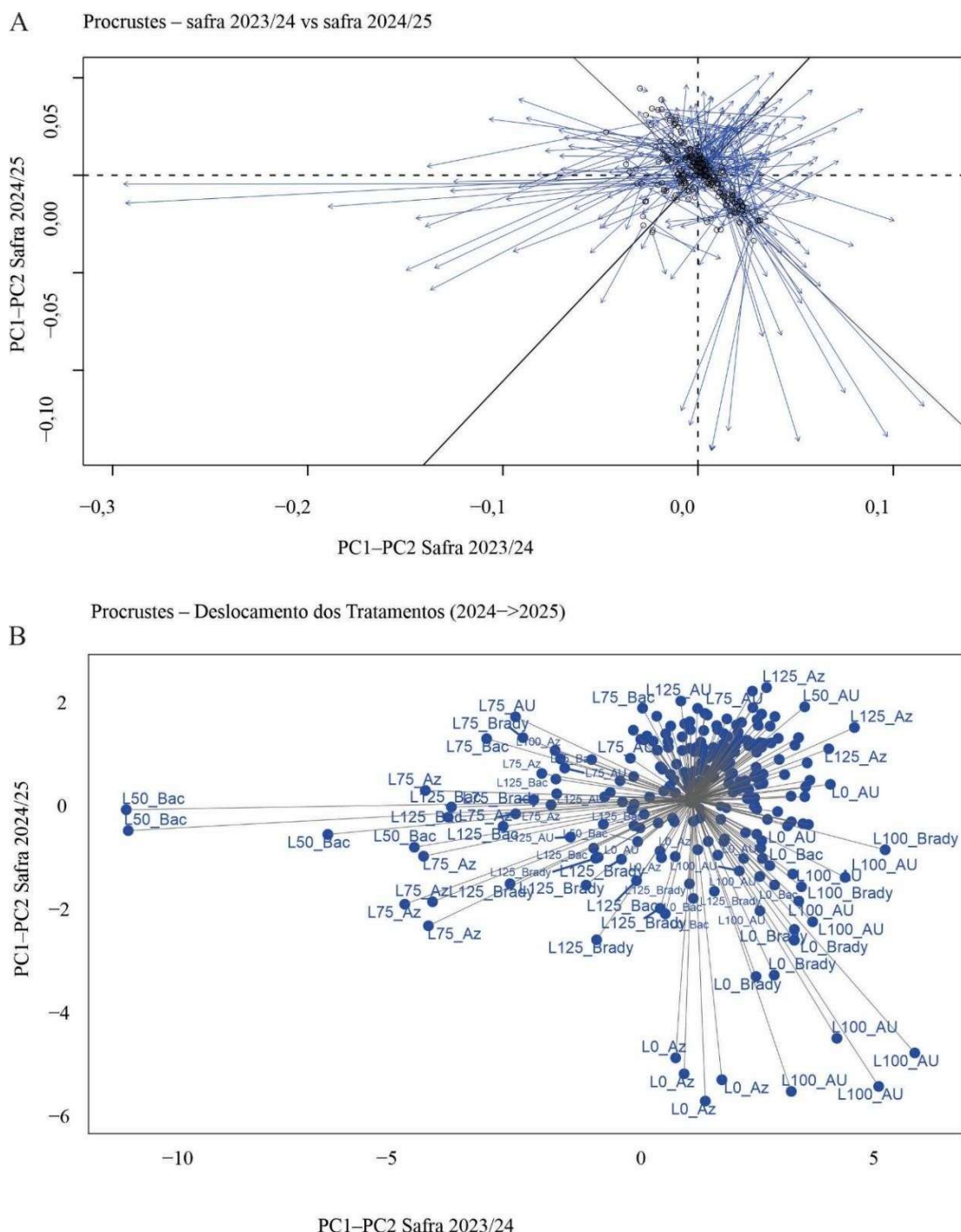


**Figura 4.** Análise Procrustes aplicada ao conjunto de variáveis avaliadas nas safras 2023/24 e 2024/25. (A) Comparação direta entre as ordenações multivariadas dos dois anos e (B) Deslocamento multivariado de cada tratamento (combinação lâmina  $\times$  inoculante) entre 2023/24 e 2024/25. Au - *B. japonicum* + *B. aryabhattai*; Az - *B. japonicum* + *A. brasilense*; Bac - *B. japonicum* + *B. subtilis* + *B. megaterium*; Brady - *B. japonicum*.

A Figura 4A compara diretamente as ordenações multivariadas das duas safras. As setas representam o deslocamento necessário para alinhar as posições de 2023/24 às de 2024/25, após transformação que padroniza escala, rotação e translação. A proximidade dos pontos e a direção semelhante dos vetores indicam que, apesar das diferenças climáticas entre os anos (Figura 1), existe alta correspondência estrutural entre as respostas multivariadas das duas safras. Ou seja, embora o ambiente tenha influenciado a magnitude das variáveis, o padrão geral de correlação entre elas permaneceu semelhante entre 2023/24 e 2024/25. Esse resultado reforça o observado no NMDS: o ano agrícola altera o posicionamento das parcelas na ordenação (magnitude das respostas), mas não altera completamente a organização interna das relações fisiológicas e agronômicas. Fenômeno semelhante foi verificado por (Ergo *et al.*, 2018) que verificaram manutenção parcial da estrutura multivariada mesmo sob contrastes hídricos e térmicos.

Contudo, a presença de vetores maiores em algumas parcelas indica que houve mudança mais acentuada na estrutura multivariada entre os anos para alguns tratamentos. Esses deslocamentos maiores são coerentes com o elevado contraste hídrico observado na safra 2023/24, marcada por maior déficit e maior demanda atmosférica.

Na Figura 4B está apresentado o comportamento temporal dos tratamentos, destacando o deslocamento multivariado de cada combinação lâmina  $\times$  inoculante. Nesta Figura, cada ponto representa um tratamento, e a seta indica como essa combinação se alterou da safra de 2023/24 para a safra de 2024/25.

De modo geral, observou-se que a grande maioria dos tratamentos apresentou deslocamentos curtos na ordenação, indicando coerência temporal entre os anos. Essa concentração de vetores reduzidos e convergindo para uma mesma região sugere que a resposta multivariada da soja se manteve relativamente estável, mesmo diante das diferenças ambientais registradas entre as safras. Assim, apesar da variabilidade climática, o conjunto fisiológico e agronômico da cultura demonstrou robustez estrutural.

Por outro lado, os tratamentos das lâminas de 75 e 125% da ETc apresentaram maior sensibilidade temporal para os inoculantes *B. japonicum* e *A. brasilense*. Esse comportamento indica maior adaptação da planta a condições mais favoráveis, podendo nesses tratamentos, ajustar de forma mais intensa processos como nodulação, alocação de fotoassimilados e desenvolvimento reprodutivo em resposta às diferenças ambientais entre anos, conforme relatado por (Rondina *et al.*, 2020; Barbosa *et al.*, 2021).

Em contraste, os tratamentos de 0 e 50% da ETc foram os mais estáveis entre as safras. Esses tratamentos apresentaram vetores curtos e pouco direcionados, indicando baixa sensibilidade às variações ambientais. Em situações de restrição hídrica, a fisiologia da planta tende a operar em modo conservativo, reduzindo a plasticidade metabólica e limitando ajustes finos entre anos (Fatema *et al.*, 2023; Xu *et al.*, 2023).

Os resultados obtidos pelas análises NMDS e Procrustes demonstraram que, embora exista diferenciação multivariada entre as safras e variação temporal em alguns tratamentos, a estrutura geral das respostas agronômicas apresenta coerência, permitindo identificar padrões consistentes de estabilidade e sensibilidade entre os anos. Entretanto, essas abordagens capturam apenas a estrutura multivariada global das respostas. Para compreender quais tratamentos apresentam melhor desempenho produtivo, maior estabilidade temporal e adaptação a cada ambiente, torna-se necessário empregar uma análise orientada especificamente para interação tratamento  $\times$  ambiente. Assim, o GGE-Biplot foi utilizado para integrar produtividade média e estabilidade entre as safras 2023/24 e 2024/25, permitindo identificar os tratamentos superiores nas safras avaliadas.

Embora as análises NMDS e Procrustes tenham evidenciado diferenças estruturais importantes entre as safras e revelado a magnitude dos deslocamentos temporais entre os tratamentos, essas abordagens não identificam diretamente quais variáveis agronômicas são responsáveis por essas alterações nem como os componentes morfofisiológicos da cultura se reorganizam em cada ambiente. Assim, para compreender a base fisiológica e produtiva que sustenta os padrões multivariados observados, torna-se essencial investigar a arquitetura interna das relações entre variáveis dentro de cada ano. Com esse objetivo, foram construídos heatmaps de correlação para as safras 2023/24 e 2024/25 (Figura 5), os quais permitem visualizar como as variáveis respostas se associam sob diferentes condições ambientais.

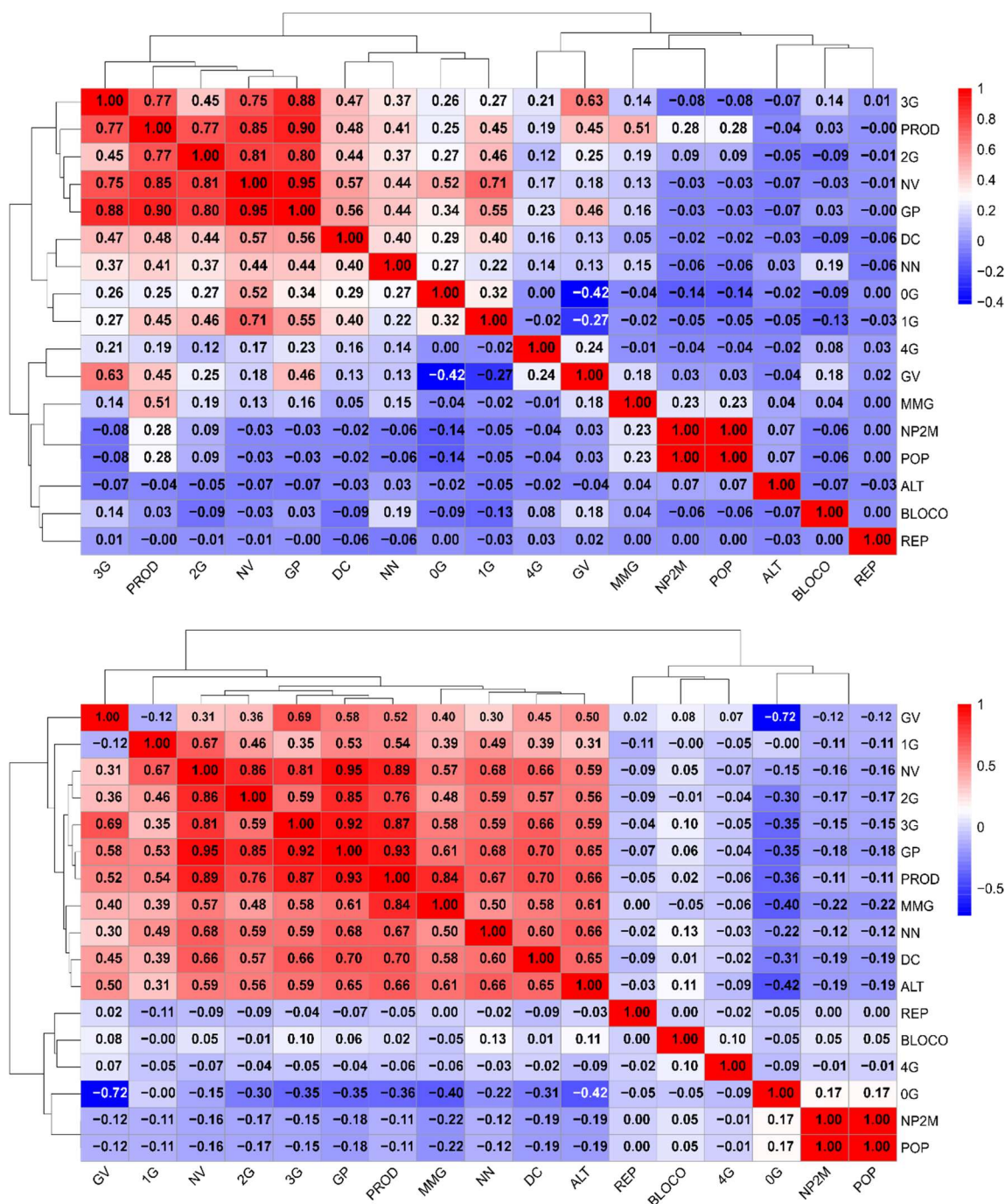


**Figura 5.** Heatmaps de correlação das variáveis respostas nas safras 2023/24 (A) e 2024/25 (B), com agrupamento hierárquico por distância euclidiana e correlações de Pearson. As cores representam a força das associações entre variáveis, evidenciando maior fragmentação em 2023/24 e maior integração fisiológica em 2024/25. G - Grãos; GV - Grãos/vagem; NV - Número de vagens; GP - Gão/planta; PROD - Produtividade; MMG - Massa de mil grãos; NN - Número de nós; DC - Diâmetro do caule; ALT - Altura de planta; REP - Repetições; NP2M - Número de plantas em 2 metros; POP - População de plantas.

Verifica-se na Figura 5A que na safra 2023/24 a produtividade (PROD) apresentou correlação alta com o número de vagens (NV), número de vagens cheias (2G, 3G) e massa de mil grãos (MMG), formando um bloco bem definido de componentes de produção. Entretanto, variáveis como número de nós (NN), diâmetro de caule (DC) e

altura (ALT) mostraram correlações mais fracas e negativas, refletindo a condição de maior estresse hídrico na safra 2023/24, onde limitações hídricas tendem a reduzir a consistência fisiológica desses componentes (Ferrari *et al.*, 2018).

Para a safra 2024/25 (Figura 5B), a matriz de correlação revela uma estrutura mais coesa e organizada, com um grande bloco de alta correlação positiva envolvendo as variáveis produtivas (NV, 1G, 2G, 3G, GP, PROD e MMG). Esse comportamento reforça os resultados do Procrustes, que apontou maior deslocamento multivariado e maior plasticidade fisiológica em tratamentos sob lâminas altas justamente na safra 2024/25, quando o ambiente favoreceu maior variação dos processos internos.

A análise dos heatmaps permitiu identificar como os componentes produtivos e vegetativos se organizam internamente em cada safra, revelando diferenças da cultura entre 2023/24 e 2024/25. No entanto, embora essas matrizes possam fornecer um panorama das diferenças multivariadas entre os anos, elas não indicam quais tratamentos apresentam melhor desempenho produtivo nem qual é a estabilidade temporal dessas respostas frente às variações ambientais. Assim, para avançar da análise das relações entre variáveis para a avaliação da performance comparativa dos tratamentos e da interação tratamento  $\times$  ambiente, empregou-se o GGE-Biplot (Figura 6).

A avaliação integrada do desempenho produtivo e da estabilidade dos tratamentos entre os ambientes foi realizada por meio do GGE Biplot (Figura 6). Essa abordagem permite identificar simultaneamente quais combinações de lâmina  $\times$  inoculante apresentam maior produtividade média, maior estabilidade entre as safras e melhor adaptação específica aos ambientes contrastantes.

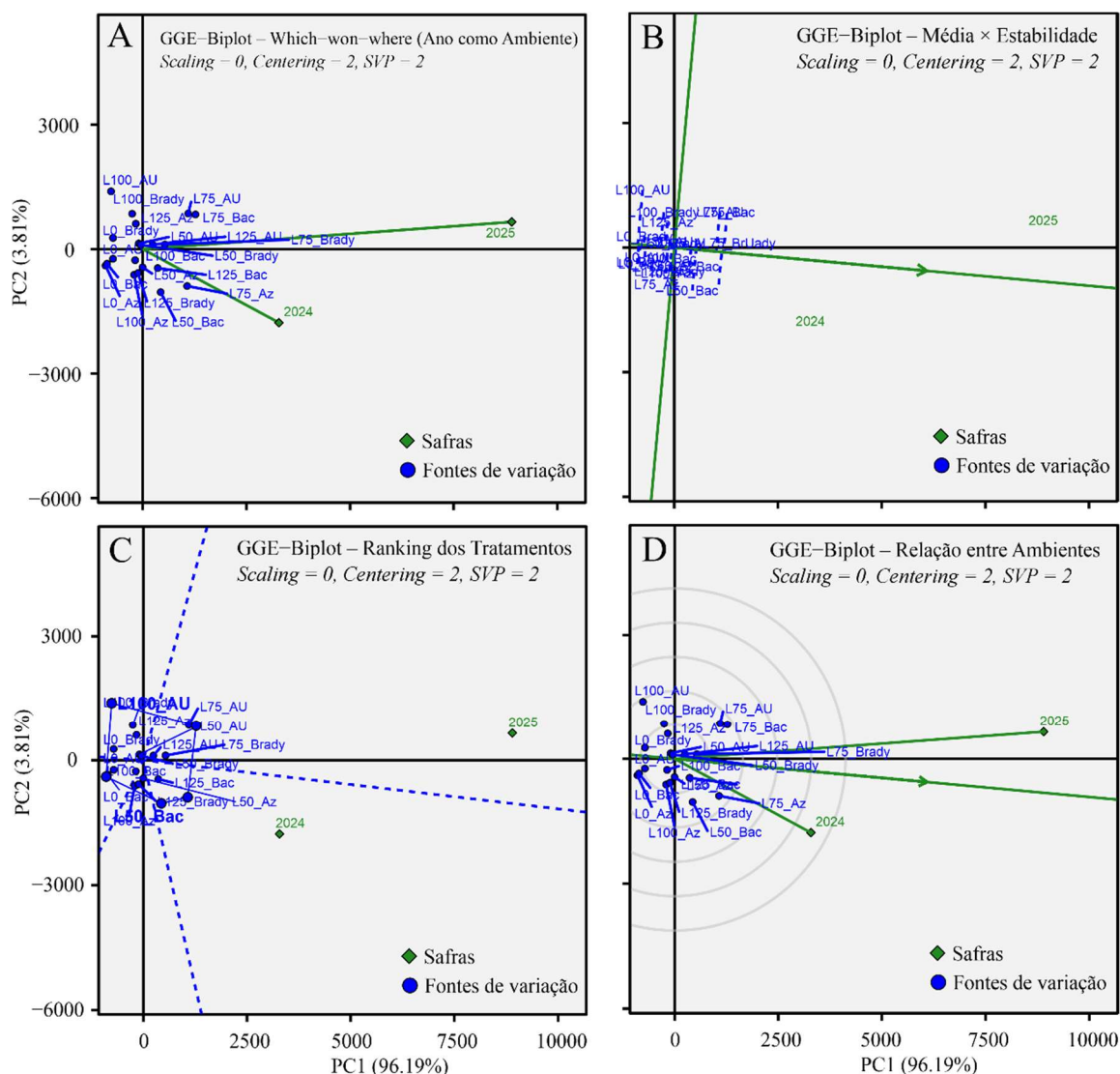


**Figura 6.** GGE Biplot das combinações de lâmina  $\times$  inoculante nas safras 2023/24 e 2024/25, apresentando o desempenho médio (PC1), estabilidade (PC2), (A) Gráfico “Which-won-where”, destacando os tratamentos mais responsivos em cada safra; (B) Relação entre média e estabilidade, permitindo identificar os tratamentos com melhor desempenho geral; (C) Ranking dos tratamentos segundo o modelo GGE, integrando produtividade e estabilidade; (D) Relação entre as safras, evidenciando o grau de similaridade entre 2023/24 e 2024/25.

Na Figura 6A é possível observar que as duas safras se posicionam em setores distintos do polígono formado pelos tratamentos, confirmando o contraste entre as safras já identificado nas análises anteriores. A safra 2023/24, caracterizada por maior restrição hídrica e maior demanda atmosférica, localiza-se em um setor associado a tratamentos menos produtivos, enquanto a safra 2024/25, conduzida sob condições mais favoráveis, é representada por um vértice diferente, evidenciando desempenho superior e caracterizada por tratamentos mais produtivos e responsivos. Os vértices do polígono correspondem aos tratamentos que mais se destacam em cada ambiente, e é possível perceber que tratamentos envolvendo lâminas de 75 e 100% da ETc associados

apresentaram desempenho superior em 2024/25. Por outro lado, a safra 2023/24 favoreceu mais as combinações com 100% da ETc ou com coinoculação com *B. subtilis* + *B. megaterium*, devido à maior resiliência desses tratamentos frente ao estresse hídrico.

A análise de Média × Estabilidade apresentada na Figura 6B permite compreender simultaneamente o desempenho médio (PC1) e a estabilidade entre anos (PC2). Tratamentos localizados no quadrante positivo de PC1 e próximos ao eixo horizontal são aqueles que combinam maior produtividade e maior estabilidade temporal, tornando-se mais promissores para recomendação agrônômica. Nesse sentido, destacaram-se as combinações com 100% da ETc, além dos tratamentos de 75% da ETc com os tratamentos Coinoculados com *A. brasilense* e *B. japonicum*. Em contrapartida, tratamentos que se dispersam mais ao longo de PC2 apresentaram maior instabilidade temporal, comportamento coerente com os deslocamentos observados no Procrustes, indicando maior plasticidade fisiológica sob condições mais favoráveis. Assim, embora esses tratamentos possam atingir altos rendimentos, sua dependência do ambiente limita sua previsibilidade entre safras.

Na Figura 6C é realizada a hierarquização de forma direta do desempenho das combinações nos dois ambientes. Os tratamentos mais próximos da seta de classificação apresentam o melhor desempenho geral. Nesse ranking, verificou-se que a lâmina de irrigação de 100% da ETc combinada com *B. aryabhattai*, *A. brasilense* e *B. subtilis* + *B. megaterium* apresentaram os melhores resultados, seguidos pelas combinações de 75% da ET com *B. aryabhattai*, *A. brasiliense* e *B. japonicum*. Verificou-se menores desempenhos para os tratamentos de 0 e 50% da ETc, o que confirma a importância da reposição hídrica adequada para o pleno desenvolvimento produtivo da cultura.

A relação entre ambientes, apresentada na Figura 6D, evidencia que vetor referente a 2024/25 é mais longo, indicando maior capacidade discriminante entre os tratamentos. Além disso, o ângulo entre os vetores dos dois anos não é reduzido, o que confirma que as safras representam ambientes marcadamente distintos para a soja irrigada. Esse resultado está em perfeita consonância com os padrões identificados no NMDS e Procrustes, reforçando que a resposta da cultura precisa ser interpretada dentro do contexto ambiental específico de cada safra. Assim, qualquer recomendação agrônômica deve considerar a estabilidade e o comportamento adaptativo dos tratamentos, e não apenas seus valores médios de produtividade.

De forma integrada, o GGE-Biplot demonstra que há forte interação entre tratamento  $\times$  ambiente e que as lâminas de 100% da ETc, assim como algumas combinações de lâminas de 75% da ETc com coinoculação, apresentam melhor desempenho e maior estabilidade entre as safras.

As safras avaliadas são claramente diferenciadas, justificando o uso de ferramentas multivariadas. Nenhum tratamento se destaca como universalmente superior; ao contrário, cada combinação apresenta desempenho variável de acordo com as condições ambientais predominantes em cada safra. Assim, o GGE-Biplot complementa de forma robusta o NMDS e o Procrustes ao integrar desempenho produtivo e estabilidade temporal, fornecendo elementos fundamentais para identificação de tratamentos mais confiáveis e mais adaptados às condições de cultivo irrigado.

Os resultados multivariados confirmam que, embora a magnitude das respostas varie entre anos devido às condições atmosféricas contrastantes, os padrões fisiológicos e produtivos associados aos inoculantes são consistentes entre safras. A hierarquia relativa entre as combinações lâmina  $\times$  inoculante é preservada, indicando que os efeitos microbianos possuem caráter estrutural e não aleatório. Assim, a tendência de resposta à coinoculação e à inoculação individual de *A. brasilense*, *B. aryabhattai* e *B. subtilis* + *B. megaterium* é mantida entre ambientes, ainda que modulada pelo regime hídrico.

## 4 CONCLUSÕES

O estudo demonstrou que a resposta da soja ao manejo hídrico e à inoculação é profundamente influenciada pelas condições ambientais, com fortes interações entre ano, lâmina de irrigação e tipo de inoculante. As análises univariadas e multivariadas convergiram ao indicar que níveis moderados a elevados de reposição hídrica (75 e 100% da ETc) proporcionam maior desempenho produtivo, especialmente quando associados a microrganismos promotores de crescimento, como *A. brasilense*, *B. aryabhattai* e as combinações de *B. subtilis* + *B. megaterium*.

O uso do GGE-Biplot permitiu integrar performance média e estabilidade, revelando que nenhum tratamento é universalmente superior, mas que determinadas combinações inoculante  $\times$  lâmina são mais adaptadas a ambientes específicos, enquanto outras se destacam pela estabilidade interanual.

As evidências deste trabalho reforçam que estratégias de manejo baseadas na interação entre disponibilidade hídrica e estímulo microbiano, podem aumentar

substancialmente a produtividade da soja e reduzir a vulnerabilidade às variações climáticas. Recomenda-se, portanto, a adoção de lâminas entre 75% e 100% da ETc, combinadas com coinoculações microbianas, como abordagem eficaz para sistemas irrigados, além de maior atenção às condições ambientais de cada safra para garantir decisões agronômicas mais precisas e resilientes.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), ao Programa de Suporte de Instituições Particulares PROSUP e Fundação Araucária pelo suporte financeiro.

Agradeço a Universidade Paranaense - (UNIPAR) e Universidade Estadual de Maringá (UEM) pelo apoio institucional e infraestrutura que possibilitaram o desenvolver desta pesquisa em Biotecnologia Aplicada à Agricultura.

## 5 REFERÊNCIAS

- ABDUL RAHMAN, N. S. N.; ABDUL HAMID, N. W.; NADARAJAH, K. Effects of abiotic stress on soil microbiome. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 22, n. 16, p. 9036, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms22169036>
- ABEBAW, S. E. A Global Review of the Impacts of Climate Change and Variability on Agricultural Productivity and Farmers' Adaptation Strategies. **Food Science & Nutrition**, v. 13, n. 5, p. e70260, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1002/fsn3.70260>
- AIJAZ, N.; ZAHEER, M. S.; HAMEED, A.; ASLAM, H. M. U.; ALAM, M. W.; RIAZ, H.; REHMAN, S. Improving salinity tolerance in wheat plants via inoculation with *Azospirillum brasilense* and *Bacillus subtilis* for enhanced biomass, growth, and physiological process. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 46, n. 11, p. 103, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11738-024-03727-8>
- ALAM, B.; LǏ, J.; GĚ, Q.; KHAN, M. A.; GŌNG, J.; MEHMOOD, S.; GÖNG, W. Endophytic fungi: from symbiosis to secondary metabolite communications or vice versa? **Frontiers in Plant Science**, v. 12, p. 791033, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.791033>
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. AB, W. Crop Evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO **Irrigation and Drainage paper 56**. v.300, n.56, p.1–15, 1998
- ALLI, A. Y.; IBRAHIM, M. E. H.; YAGOUB, S. O. Effects of irrigation regimes at different growth stages on seed yield and yield components of two soybeans (*Glycine max* L. (Merr.)) varieties in semi-arid conditions. *African Journal of Agricultural Research*, v. 19, n. 12, p. 1100-1120, 2023. DOI: <https://doi.org/doi.10.5897/AJAR2021.15879>
- ALMEIDA, J. P. N.; DANTAS, L. L. G. R.; ARRAIS, Í. G.; TOSTA, M. D. S.; MENDONÇA, V. Arbuscular mycorrhizal fungus, and seaweed extract in the initial growth of acerola rootstock. **Revista de Ciências Agrárias - Amazon Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v. 57, n. 1, p. 22–28, 2014. DOI: <https://doi.org/doi.10.4322/rca.2013.061>
- ANDA, A.; SIMON, B.; SOÓS, G.; SILVA, J.; FARKAS, Z.; MENYHÁRT, L. Assessment of soybean evapotranspiration and controlled water stress using traditional and converted evapotranspirometers. **Atmosphere**, v. 11, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos11080830>
- ANDA, A.; SOOS, G.; MENYHART, L.; KUCSERKA, T.; SIMON, B. Yield features of two soybean varieties under different water supplies and field conditions. **Field Crops Research: Elsevier**, v. 245, p.107673, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.107673>
- ANDRADE, N. A. O. D. & RAIHER, A. P. Impacto socioeconômico da cultura da soja nas áreas mínimas comparáveis do Brasil. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 62, p. 22, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1590/1806-9479.2022.267567>

ARAUJO JUNIOR, G. N.; GOMES, F. T.; SILVA, J. M.; JARDIM, A. M. F. R.; SIMOES, V. J. L. T. P.; IZIDORO, J. L. P. S.; LEITE, M. L. M. V.; TEIXEIRA, V. I.; SILVA, T. G. F. Estresse hídrico em plantas forrageiras: **Uma revisão Pubvet**. v. 13, n. 1, a 241, p. 1-10, 2019. DOI: <https://doi.org/10.31533/pubvet.v13n01a241.1-10>

ARAÚJO, F. F. D. & HUNGRIA, M. Soybean nodulation and yield when co-inoculated with *Bacillus subtilis* and *Bradyrhizobium japonicum*/*Bradyrhizobium elkanii*. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, p. 1633-1643, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X1999000900014>

ASIF, A.; ALI, M.; QADIR, M.; KARTHIKEYAN, R.; SINGH, Z.; KHANGURA, R. AHMED, Z. F. Enhancing crop resilience by harnessing the synergistic effects of biostimulants against abiotic stress. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, p. 1276117, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1276117>

AZIEZ, A. F. & PRASETYO, A. The effect of drought stress on the growth and yield of soybean (*Glycine max* L.). **Applied Ecology & Environmental Research**, v. 20, n. 4, 2022. DOI: [https://doi.org/10.15666/aeer/2004\\_35693580](https://doi.org/10.15666/aeer/2004_35693580)

BAGHEL, L.; KATARIA, S.; GURUPRASAD, K. N. Effect of static magnetic field pretreatment on growth, photosynthetic performance, and yield of soybean under water stress. **Photosynthetica**, v. 56, n. 2, p. 718-730, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11099-017-0722-3>

BARBOSA, J. Z.; HUNGRIA, M.; DA SILVA SENA, J.; POGGERE, G.; REIS, A. R.; CORRÊA, R. S. Meta-analysis reveals benefits of co-inoculation of soybean with *Azospirillum brasilense* and *Bradyrhizobium* spp. in Brazil. **Applied Soil Ecology**, v. 165, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.103913>

BATISTTI, R.; SENTELHAS, P. C.; PASCOALINO, J. A. L.; SAKO, H.; DE SÁ DANTAS, J. P.; MORAES, M. F. Soybean Yield Gap in the Areas of Yield Contest in Brazil. **International Journal of Plant Production**, v. 12, n. 3, p. 159–168, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42106-018-0016-0>

BATTISTI, R. & SENTELHAS, P. C. Caracterização das regiões brasileiras produtoras de soja pelos padrões de déficit hídrico. **Pesquisa de Culturas de Campo**, v. 240, p. 95-105, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.06.007>

BASU, A.; PRASAD, P.; DAS, S. N.; KALAM, S.; SAYYED, R. Z.; REDDY, M. S.; EL ENSHASY, H. Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) as green bioinoculants: recent developments, constraints, and prospects. **Sustainability**, v. 13, n. 3, p. 1140, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13031140>

BHATTACHARYYA, C.; BAKSHI, U.; MALLICK, I.; MUKHERJI, S.; BERA, B.; GHOSH, A. Genome-guided insights into the plant growth promotion capabilities of the physiologically versatile *Bacillus aryabhatai* strain AB211. **Frontiers in Microbiology**, v. 8, p. 411, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00411>

BHATTI, S.; HEEREN, D. M.; EVETT, S. R.; O'SHAUGHNESSY, S. A.; RUDNICK, D. R.; FRANZ, T. E.; NEALE, C. M. Crop response to thermal stress without yield loss in irrigated maize and soybean in Nebraska. **Agricultural Water Management**, v. 274, p. 107946, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107946>

BIGOLIN, T. & TALAMINI, E. Impacts of climate change scenarios on the corn and soybean double-cropping system in Brazil. **Climate**, v. 12, n. 3, p. 42, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/cli12030042>

BITTENCOURT, P. P.; ALVES, A. F.; FERREIRA, M. B.; DA SILVA IRINEU, L. E. S.; PINTO, V. B.; OLIVARES, F. L. Mechanisms, and applications of bacterial inoculants in plant drought stress tolerance. **Microorganisms**, v. 11, n. 2, p. 502, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms11020502>

BOUYOUCOS, G. J. A recalibration of the hydrometer method for making mechanical analysis of soils. **Agronomy Journal**, 1951, Vol. 43, 434-438, 1951

BRITO-LOPEZ, C.; VAN DER WIELEN, N.; BARBOSA, M.; KARLOVA, R. Microrganismos promotores do crescimento vegetal e bioestimulantes à base de microalgas: estratégia sustentável para a agricultura e resiliência ao estresse abiótico. **Philosophical Transactions B**, v. 380, n. 1927, p. 20240251, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1098/rstb.2024.0251>

CARVALO, N. S.; RODRIGUES, E. B. S.; SANTANA, T. S.; CANTANHRDE, L. A.; SOUSA, M.; SOUSA, R. A.; SILVA-FILHO, F. M.; MATOS, R. R. S. S. Revisão. A importância da soja para o agronegócio brasileiro. **Fitotecnia, Sistemas Agrícolas Ambientais e Solo**. p. 52-60, 2023. DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.6252331036>

CEREZINI, P.; KUWANO, B. H.; GRUNVALD, A. K.; HUNGRIA, M.; NOGUEIRA, M. A. Soybean tolerance to drought depends on the associated *Bradyrhizobium* strain. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 51, n. 4, p. 1977-1986, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42770-020-00375-1>

CHENG, Y.; JIANG, X.; HE, X.; WU, Z.; LV, Q.; ZHAO, S.; ZHANG, X.; WANG, S.; HE, H.; LIU, J. *Bacillus velezensis* 20507 promotes symbiosis between *Bradyrhizobium japonicum* USDA110 and soybean by secreting flavonoids. **Frontiers in Microbiology**, v. 16, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1572568>

CIRILLO, V.; ROMANO, I.; WOO, S. L.; DI STASIO, E.; LOMBARDI, N.; COMITE, E.; PEPE, O.; VENTORINO, V.; MAGGIO, A. Inoculation with a microbial consortium increases soil microbial diversity and improves agronomic traits of tomato under water and nitrogen deficiency. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1304627>

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Tabela de produção de grãos. **Acompanhamento da Safra Brasileira Boletim da Safra 2025-2026**. <https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/safra-de-graos/boletim-da-safra-de-graos>. Disponível em 33-11-2025.

CORBU, V. M.; GHEORGHE-BARBU, I.; DUMBRAVĂ, A. Ș.; VRÂNCIANU, C. O.; ȘESAN, T. E. Current insights in fungal importance-a comprehensive review. **Microorganisms**, v. 11, n. 6, p. 1384, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms11061384>

CUI, R.; LU, X.; CHEN, X.; MALIK, W. A.; WANG, D.; WANG, J.; YE, W. A novel raffinose biological pathway is observed by symbionts of cotton≡ *Verticillium dahliae* to improve salt tolerance genetically on cotton. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 207, n. 6, p. 956-969, 2021. DOI: <https://doi.org/doi.10.1111/jac.12556>

DA SILVA, A. P.; SILVA, C. O.; ROSA, V. R.; SANTOS, M. A.; KUKI, K. N.; DAL-BIANCO, M.; BUENO, R. D.; DE OLIVEIRA, A. K.; BRITO, D. R.; COSTA, A. C.; RIBEIRO, C. Metabolic adjustment and regulation of gene expression are essential for increased resistance to severe water deficit and resilience post-stress in soybean. **PeerJ**, v. 10, 2022. DOI: <https://doi.org/10.7717/peerj.13118>

DA-SILVA, A. L. P.; DA TRINDADE LÉLIS, A.; DE LIMA SENA, W.; DE LIMA JUNIOR, J. A. The contributions of microorganisms to soil quality in agriculture. **Peer Review**, v. 6, n. 7, p. 96-106, 2024. DOI: <https://doi.org/10.53660/PRW-2036-3725>

DI SARIO, L.; BOERI, P.; MATUS, J. T.; PIZZIO, G. A. Plant biostimulants to enhance abiotic stress resilience in crops. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 26, n. 3, p. 1129, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms26031129>

DIETZ, K. J.; ZÖRB, C.; GEILFUS, C. M. Drought and crop yield. **Plant Biology**, v. 23, n. 6, p. 881-893, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1111/plb.13304>

DING, C.; ALGHABARI, F.; RAUF, M.; ZHAO, T.; JAVED, M.; ALSHAMRANI, R.; GHAZY, A.; AL-DOSS, A.; KHALID, T.; YANG, S.; SHAH, Z. Optimization of soybean physiochemical, agronomic, and genetic responses under varying regimes of day and night temperatures. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1332414>

DON, A.; SEIDEL, F.; LEIFELD, J.; KÄTTERER, T.; MARTIN, M.; PELLERIN, S.; CHENU, C. Carbon sequestration in soils and climate change mitigation Definitions and pitfalls. **Global Change Biology**, v. 30, n. 1, p. e16983, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.16983>

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos**. Rio de Janeiro: EMBRAPA/CNPQ, p. 532, 2018.

EMBRAPA SOLOS. Manual de métodos de análise de solo. **Rio de Janeiro**, v. 997, p. 212, 1997.

ENDRES, G. e KANDEL, H. Soybean Growth and Management Quick Guide. **North Dakota State University** Fargo, North Dakota. Revised. p. 8, 2021. <http://puc.sd.gov/commission/dockets/hydrocarbonpipeline/2007/Hp07-001/hearingexhibit/anderson/landerson13g.pdf>. Disponível em: Dezembro de 2025

ERGO, V. V.; LASCANO, R. H.; VEGA, C. R. C.; PAROLA, R. L.; CARRERA, C. S. Heat and water stressed field-grown soybean: A multivariate study on the relationship between physiological-biochemical traits and yield. **Environmental and Experimental Botany**, v. 148, p. 1–11, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.12.023>

ESWARAN, S. U. D. SUNDARAM, L. PERVEEN, K. BUKHARI, N. A. SAYYED, R. Z. Osmolyte-producing microbial biostimulants regulate the growth of *Arachis hypogaea*. L. under drought stress. **BMC Microbiology**, v. 24, n. 1, p. 165, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12866-024-03320-6>

FAO - Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura. O Impacto dos Desastres na Agricultura e na Segurança Alimentar, 2023. <https://www.fao.org/brasil/noticias/detail-events/pt/c/1653890/>. Acesso em fevereiro de 2026

FAO - Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura. The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture – Systems at breaking point. Synthesis report, Rome 2021. DOI: <https://doi.org/10.4060/cb7654en>

FATEMA, M.; MAMUN, M.; SARKER, U.; HOSSAIN, M.; MIA, M.; ROYCHOWDHURY, R.; ERCİŞLI, S.; MARC, R.; BABALOLA, O.; KARIM, M. Assessing morpho-physiological and biochemical markers of soybean for drought tolerance potential. **Sustainability**, v. 15, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15021427>

FERIOUN, M.; ZOUITANE, I.; BOUHRAOUA, S.; ELOUATTASSI, Y.; BELAHCEN, D.; ERRABBANI, A.; EL GHACHTOULI, N. Applying microbial biostimulants and drought-tolerant genotypes to enhance barley growth and yield under drought stress. **Frontiers in Plant Science**, v. 15, p. 1494987, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1494987>

FERRARI, M.; CARVALHO, I. R.; PELEGRIN, A. J.; NARDINO, M.; SZARESKEI, V. J.; OLIVOTO, T.; ROSA, T. C.; FOLLMANN, D. N.; PEGORARO, C.; MAIA, L. C.; SOUZA, V. Q. Path analysis and phenotypic correlation among yield components of soybean using environmental stratification methods. **Australian Journal of Crop Science**, v. 12, p. 193–202, 2018. DOI: <https://doi.org/10.21475/ajcs.18.12.02.pne488>

FLUMIGNAN, D. L.; ALMEIDA, A. dos S.; GARCIA, R. A. Necessidade de irrigação complementar da soja na região sul de Mato Grosso do Sul. EMBRAPA, **Circular técnica** 43, Dourados, N. S. Setembro 2015

GAO, Y.; XU, Y.; DONG, Z.; GUO, Y.; LUO, J.; WANG, F.; ZOU, X. Endophytic fungal diversity and its interaction mechanism with medicinal plants. **Molecules**, v. 30, n. 5, p. 1028, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules30051028>

GAVA, R.; FRIZZONE, J. A.; SNYDER, R. L.; JOSE, J. V.; FRAGA-JUNIOR, E. F.; PERBONI, A. O estresse hídrico em diferentes fases da cultura da soja. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada-RBAI**, v. 9, n. 6, p. 349-359, 2015. DOI: <https://doi.org/10.7127/rbai.v9n600368>

GAZZONI, D. L. A soja no Brasil é movida por inovações tecnológicas. **Ciência e Cultura**, v. 70, n. 3, p. 16-18, 2018. DOI: <https://doi.org/10.21800/2317-66602018000300005>

GOKKUS, M. K.; TANRIVERDI, C.; DEGIRMENCI, H. Water Stress Indices as Indicators of Silage Soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] Productivity Under Drought Conditions. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 211, n. 1, p. e70025, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1111/jac.70025>

HAGHVERDI, A. LEIB, B. WASHINGTON-ALLEN, R. WRIGHT, W. C. GHODSI, S. GRANT, T. VANCHIASONG, P. Studying crop yield response to supplemental irrigation and the spatial heterogeneity of soil physical attributes in a humid region. **Agriculture**, v. 9, n. 2, p. 43, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture9020043>

HEMAREDDY, T. H.; PATIL, R. S.; BHEEMASHANKAR, B.; RIZWAN, S.; MAHESH, H.; AMITH, G.; SHREEPAD, H.; DIVAKARA, D. M. Sustainable water resource management under changing climate in north interior Karnataka: Insights from CROPWAT modelling on soybean. **Plant Science Today**, v. 12, 2025. DOI: <https://doi.org/10.14719/pst.7354>

HERNANI, L. C.; de-FREITAS, P. L.; RAINOLDO, J. E. D.; KOCHOHANN, A.; De-MARIA, I. C.; LANDERS, J. N. Uma Resposta Conservacionista – o Impacto do Sistema Plantio Direto. In no livro: **Uso Agrícola dos Solos Brasileiros**, cap. 14, p.151-161, 2002

HERRITT, M. & FRITSCHI, F. Characterization of photosynthetic phenotypes and chloroplast ultrastructural changes of soybean (*Glycine max*) in response to elevated air temperatures. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00153>

HUNGRIA, M. Inoculação com *Azospirillum brasilense*: inovação em rendimento a baixo custo. Embrapa soja. **Documentos** 325, p. 32, 2011

HOSSEINI-MOGHADDAM, M.; MORADI, A.; PIRI, R.; GLICK, B. R.; FAZELI-NASAB, B.; SAYYED, R. Z. Seed coating with minerals and plant growth-promoting bacteria enhances drought tolerance in fennel (*Foeniculum vulgare* L.). **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 58, p. 103202, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2024.103202>

HU, S. LIU, C. LIU, X. The beneficial effects of soybean proteins and peptides on chronic diseases. **Nutrients**, v. 15, n. 8, p. 1811, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu15081811>.

ILYAS, N.; MUMTAZ, K.; AKHTAR, N.; YASMIN, H.; SAYYED, R. Z.; KHAN, W.; ALI, Z. Exopolysaccharides producing bacteria for the amelioration of drought stress in wheat. **Sustainability**, v. 12, n. 21, p. 8876, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12218876>

IPPOLITO, M.; DE CARO, D.; CANNAROZZO, M.; PROVENZANO, G.; CIRAOLO, G. Evaluation of daily crop reference evapotranspiration and sensitivity analysis of FAO Penman-Monteith equation using ERA5-Land na Sicília, Itália. **Agricultural Water Management**, v.295, p.108732, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108732>

KAFI, M.; NABATI, J.; REZAZADEH, E. B.; OSKOUEIAN, A.; SOURESHJANI, H. K. Single and poly capsule sesame (*Sesamum indicum* L.) productivity in response to plant growth-promoting rhizobacteria and foliar application of silicon, potassium, and calcium. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 44, n. 10, p. 103, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11738-022-03437-z>

KHAN, N.; BANO, A.; RAHMAN, M. A.; GUO, J.; KANG, Z.; BABAR, M. A. Comparative physiological and metabolic analysis reveals a complex mechanism involved in drought tolerance in chickpea (*Cicer arietinum* L.) induced by PGPR and PGRs. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 2097, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-38702-8>

KIM, M. Y.; JANG, G. Y.; LEE, Y. J.; KIM, K. M.; KIM, D. J.; LEE, J.; JEONG, H. S. Application of high hydrostatic pressure for production of bioactive soyasaponin from black soybean [*Glycine max* (L.)]. **Journal of Food and Nutrition Research**, v. 7, n. 4, 2023. DOI: <https://doi.org/10.12691/jfnr-7-4-3>

KORIYAMA, T.; TERANAKA, K.; TSUCHIDA, M.; KASAI, M. Effects of storage and roasting condition on the antioxidant activity of soybeans with different colors of seed coat. **Foods**, v. 12, n. 1, p. 92, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods12010092>

LI, X.; AWAIS, M.; WANG, S.; ZHANG, Z.; ZHAO, S.; LIU, Y.; LI, T. The process of nitrogen-adaptation root endophytic bacterial rather than phosphorus-adaptation fungal subcommunities construction unveiled the tomato yield improvement under long-term fertilization. **Frontiers in Microbiology**, v. 15, p. 1487323, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1487323>

LI, Y.; HUANG, G.; CHEN, Z.; XIONG, Y.; HUANG, Q.; XU, X.; HUO, Z. Effects of irrigation and fertilization on grain yield, water and nitrogen dynamics and their use efficiency of spring wheat farmland in an arid agricultural watershed of Northwest China. **Agricultural Water Management**, v. 260, p. 107277, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107277>

LIU, J.; LI, H.; YUAN, Z.; FENG, J.; CHEN, S.; SUN, G.; WEI, Z.; HU, T. Effects of microbial fertilizer and irrigation amount on growth, physiology, and water use efficiency of tomato in greenhouse. **Scientia Horticulture**, v. 321, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112553>

LIU, J.; ZHANG, J.; SHI, Q.; LIU, X.; YANG, Z.; HAN, P.; LI, J.; WEI, Z.; HU, T.; LIU, F. The interactive effects of deficit irrigation and *Bacillus pumilus* inoculation on growth and physiology of tomato plant. **Plants**, v. 12, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants12030670>

LIU, W.; YE, T.; JÄGERMEYR, J.; MÜLLER, C.; CHEN, S.; LIU, X.; SHI, P. Future climate change significantly alters interannual wheat yield variability over half of harvested areas. **Environmental Research Letters**, v. 16, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac1fbb>

LONGLEY, R.; NOEL, Z. A.; BENUCCI, G. M. N.; CHILVERS, M. I.; TRAIL, F.; BONITO, G. Crop Management Impacts the Soybean (*Glycine max*) Microbiome. **Frontiers in Microbiology**, v. 11, p. 1116, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.01116>

MACHADO, M. R.; MAGGI, M. F.; HACHISUCA, A. M.; MERCANTE, E.; SILVA, F. R. Regional weather variations and yields achieved in soybean crops. **Journal of Agricultural Science**, v. 15, n. 5, 2023. DOI: <https://doi.org/10.5539/jas.v15n5p10>

MADENDE, M. & HAYES, M. Fish by-product use as biostimulants: An overview of the current state of the art, including relevant legislation and regulations within the EU and USA. **Molecules**, v. 25, n. 5, p. 1122, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules25051122>

MALIK, A.; MOR, V. S.; TOKAS, J.; PUNIA, H.; PUNIA, H.; MALIK, S.; MALIK, K.; SANGWAN, S.; TOMAR, S.; SINGH, P.; SINGH, N.; HIMAGNINI.; VIKRAM.; NIDHI.; SINGH, G.; KUMAR, V.; SANDHYA.; KARWASRA, A. Biostimulant-treated seedlings under sustainable agriculture: A global perspective facing climate change. **Agronomy**, v.11, n. 14, p. 1-24, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy11010014>

MANGANYI, M. C. & ATEBA, C. N. Untapped potentials of endophytic fungi: A review of novel bioactive compounds with biological applications. **Microorganisms**, v. 8, n. 12, p. 1934, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms8121934>

MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. Irrigação. Princípios e métodos. 3 ed. UFV, **Universidade Federal de Viçosa**, p. 355, 2009

MARINKOVIĆ, J.; MILJAKOVIĆ, D.; ĐORĐEVIĆ, V.; VASILJEVIĆ, M.; TAMINDŽIĆ, G.; MILADINOVIĆ, J.; VASILJEVIĆ, S. Perspectives of *Bradyrhizobium* and *Bacillus* inoculation for improvement of soybean tolerance to water deficit. **Agronomy**, v. 14, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy14112692>

MASSARI, C.; MODANESI, S.; DARI, J.; GRUBER, A.; DE LANNOY, G. J. M.; GIROTTO, M.; QUINTANA-SEGÚ, P.; LE PAGE, M.; JARLAN, L.; ZRIBI, M.; OUAADI, N.; VREUGDENHIL, M.; ZAPPA, L.; DORIGO, W.; WAGNER, W.; BROMBACHER, J.; PELGRUM, H.; JAQUOT, P.; FREEMAN, V.; VOLDEN, E.; PRIETO, D. F.; TARPANELLI, A.; BARBETTA, S.; BROCCA, L. A review of irrigation information retrievals from space and their utility for users. **Remote Sensing**, v. 13, n. 20, p. 1–26, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs13204112>

MAWAR, R.; RANAWAT, M.; RAM, L.; SAYYED, R. Z. Harnessing drought-tolerant PGPM in arid agroecosystem for plant disease management and soil amelioration. In: **Plant Growth Promoting Microorganisms of Arid Region**. Singapore: Springer Nature Singapore, p. 27-43, 2023 DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture15232479>

MAY, A.; MOREIRA, B. C.; MASCARIN, G. M.; VIANA, R. S.; SANTOS, M. M.; SILVA, E. M.; RAMOS, N. F.; MELO, I. S. Induction of drought tolerance by inoculation of *Bacillus aryabhattai* on sugarcane seedlings. **Scientific**, v. 47, p. 400–410, 2019. DOI: <https://doi.org/10.15361/1984-5529.2019v47n4p400-410>

MAY, A.; SANTOS, M. M.; SILVA, E. M.; VIANA, R. S.; VIEIRA, N. R.; RAMOS, N. F.; MELO, I. S. Effect of *Bacillus aryabhattai* on the initial establishment of pre-sprouted seedlings of sugarcane varieties. Research, **Society and Development**, v. 10, 2021. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i2.12337>

MEDYOUNI, I.; ZOUAOU, R.; RUBIO, E.; SERINO, S.; AHMED, H. B.; BERTIN, N. Effects of water deficit on leaves and fruit quality during the development period in tomato plant. **Food Science & Nutrition**, v. 9, n. 4, p. 1949-1960, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/fsn3.2160>

MILJAKOVIĆ, D.; MARINKOVIĆ, J.; TAMINDŽIĆ, G.; ĐORĐEVIĆ, V.; TINTOR, B.; MILOŠEVIĆ, D.; IGNJATOV, M.; NIKOLIĆ, Z. Bio-priming of soybean with *Bradyrhizobium japonicum* and *Bacillus megaterium*: Strategy to improve seed germination and the initial seedling growth. **Plants**, v. 11, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants11151927>

MIR, M. S.; RAJA, W.; KANTH, R. H.; DAR, E. A.; SHAH, Z. A.; BHAT, M. A.; SALEM, A. Optimizing irrigation and nitrogen levels to achieve sustainable rice productivity and profitability. **Scientific Reports**, v. 15, n. 1, p. 6675, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-90464-8>

MISHRA, R.; TRIPATHI, M. K.; SIKARWAR, R. S.; SINGH, Y.; TRIPATHI, N. Soja *Glycine max* (L.) Merr. Uma leguminosa multifuncional que molda o nosso mundo. **Biociencia de Células Vegetais e Biologia Molecular**, v. 25, n. 3-4, p. 17-37, 2024. DOI: <https://doi.org/10.56557/PCBMB/2024/v25i3-48643>

MPANGA, I. K. & IDOWU, O. J. A. Decade of irrigation water use trends in southwestern USA: The role of irrigation technology, best management practices, and outreach education programs **Agricultural Water Management**, v. 243, p. 106438, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106438>

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

NAOE, A. L. R.; PELUZIO, J. M.; CAMPOS, L. J. M.; NAOE, L. K.; SILVA, R. C. Co-inoculation with *Azospirillum brasilense* in soybean cultivars subjected to water deficit. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 24, n. 2, p. 89–94, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v24n2p89-94>

NIU, H.; WANG, T.; DAI, Y.; YAO, M.; LI, B.; ZHENG, J.; MAO, L.; ZHAO, M.; XU, Z.; ZHANG, F. Optimal irrigation and fertilization enhanced tomato yield and water and nitrogen productivities by increasing rhizosphere microbial nitrogen fixation. **Agronomy**, v. 14, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy14092111>

OGUNKANMI, L.; MACCARTHY, D.; ADIKU, S. Impact of extreme temperature and soil water stress on the growth and yield of soybean (*Glycine max*). **Agriculture**, v. 12, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture12010043>

OLIVEIRA, J. G. A. D.; REIS, H. S. D.; ARAÚJO, J. F.; BOMFIM, L. S. V.; BARBOSA, A. C. F. Biodiversidade e a revitalização dos solos-da ação microbiológica à adição de nutrientes para remineralização. **Ciência Florestal**, v. 35, p. e70819, 2025. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509870819>

PARRAY, J. A.; EGAMBERDIEVA, D.; ABD\_ALLAH, E. F.; SAYYED, R. Z. Soil microbiome metabolomics: a way forward to sustainable intensification. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 7, p. 1251054, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1251054>

PASCUTTI, M. C. D.; SILVESTRE, R. da S. F.; ORTIZ, T. A. The role of microorganisms in sustainable agriculture: a review. **REVISTA DELOS**, v. 17, n. 52, p. e1253-e1253, 2024. DOI: <https://doi.org/10.55905/rdelosv17.n52-001>

PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. "Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification", **Hydrology and Earth System Sciences**, v.11, n.5, p. 1633–1644, 2007. DOI: 10.5194/hess-11-1633-2007. Disponível em: <http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/11/1633/2007/>. 10 de fevereiro de 2026

POVEDA, J. & BAPTISTA, P. Filamentous fungi as biocontrol agents in olive (*Olea europaea* L.) diseases: Mycorrhizal and endophytic fungi. **Crop Protection**, v. 146, p. 105672, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2021.105672>

POVEDA, J.; ABRIL-URIAS, P.; ESCOBAR, C. Biological control of plant-parasitic nematodes by filamentous fungi inducers of resistance: Trichoderma, mycorrhizal and endophytic fungi. **Frontiers in Microbiology**, v. 11, p. 992, 2020a. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.00992>

POVEDA, J.; EUGUI, D.; ABRIL-URÍAS, P.; VELASCO, P. Endophytic fungi as direct plant growth promoters for sustainable agricultural production. **Symbiosis**, v. 85, n. 1, p. 1-19, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13199-021-00789-x>

RAMOS, M. R.; DE MELO, R. S.; SOARES, R. Solos de textura arenosa: uma revisão acerca do uso e manejo no Estado do Tocantins. **Revista Sapiência: Sociedade, Saberes e Práticas Educacionais**, v. 14, n. 01, p. 01-22, 2025. DOI: <https://doi.org/10.31668/p62ajc47>

RAVELOMBOLA, F.; ACUÑA, A.; FLOREZ-PALACIOS, L.; WU, C.; HARRISON, D.; DEOLIVEIRA, M.; MOZZONI, L. Impact of Delaying Irrigation on Wilting, Seed Yield, and Other Agronomic Traits of Determinate MG5 Soybean. **Agronomy**, v. 12, n. 5, p. 1115, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy12051115>

RAY, D. K.; GERBER, J. S.; MACDONALD, G. K.; WEST, P. C. Climate variation explains a third of global crop yield variability. **Nature Communications**, v. 6, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1038/ncomms6989>

ROLBIECKI, S.; KASPERSKA-WOŁOWICZ, W.; JAGOSZ, B.; SADAN, H. A.; ROLBIECKI, R.; SZCZEPANEK, M.; ŁANGOWSKI, A. Water and irrigation requirements of *Glycine max* (L.) Merr. in 1981–2020 in central Poland, central Europe. **Agronomy**, v. 13, n. 9, p. 2429, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy13092429>

RONDINA, A. B.; SANZOVO, A. W.; DA SILVA GUIMARÃES, G. C.; WENDLING, J. R.; NOGUEIRA, M. A.; HUNGRIA, M. 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, p. 537–549, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00374-020-01453-0>

SANTOS, J. A.; GONZAGA, M. I. S.; DOS SANTOS, W. M.; DA SILVA, A. J. Water retention and availability in tropical soils of different textures amended with biochar. **Catena**, v. 219, p. 106616, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106616>

SCHWAB, S.; HIRATA, E. S.; AMARAL, J. C. A.; DA SILVA, C. G. N.; FERREIRA, J. P.; DA SILVA, L. V.; REIS, V. M. Quantifying and visualizing *Nitrospirillum amazonense* strain CBAmC in sugarcane after using different inoculation methods. **Plant and Soil**, v. 488, n. 1, p. 197–216, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-023-05940-9>

SCHWALBERT, R. M.; AMADO, T. J. C.; CORASSA, G. M.; POTT, L. P.; PRASAD, P. V. V.; CIAMPITTI, I. A. Satellite-based soybean yield forecast: Integrating machine learning and weather data for improving crop yield prediction in southern Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 284, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107886>

SEHGAL, A.; SITA, K.; KUMAR, J.; KUMAR, S.; SINGH, S.; SIDDIQUE, K. H.; NAYYAR, H. Effects of drought, heat and their interaction on the growth, yield and photosynthetic function of lentil (*Lens culinaris* Medikus) genotypes varying in heat and drought sensitivity. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, p. 1776, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01776>

SELEIMAN, M. F.; AL-SUHAIBANI, N.; ALI, N.; AKMAL, M.; ALOTAIBI, M.; REFAY, Y.; DINDAROGLU, T.; ABDUL-WAJID, H. H.; BATTAGLIA, M. L. Drought stress impacts on plants and different approaches to alleviate its adverse effects. **Plants**, v. 10, n. 2, p. 1–25, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants10020259>

SHETEIWY, M. S.; ALI, D. F. I.; XIONG, Y. C.; BRESTIC, M.; SKALICKY, M.; HAMOUD, Y. A.; EL-SAWAH, A. M. Physiological and biochemical responses of soybean plants inoculated with Arbuscular mycorrhizal fungi and *Bradyrhizobium* under drought stress. **BMC Plant Biology**, v. 21, n. 1, p. 195, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12870-021-02949-z>

SHETEIWY, M. S.; SHAO, H.; QI, W.; DALY, P.; SHARMA, A.; SHAGHALEH, H.; LU, H. Seed priming and foliar application with jasmonic acid enhance salinity stress tolerance of soybean (*Glycine max* L.) seedlings. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 101, n. 5, p. 2027–2041, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/jsfa.10822>

SILVA, A. C. D.; GREGORIO DA SILVA, D. C.; FERREIRA, E. G. C.; ABDELNOOR, R. V.; BORÉM, A.; ARIAS, C. A.; MARCELINO-GUIMARÃES, F. C. Genetic diversity, population structure in a historical panel of Brazilian soybean cultivars. **PloS One**, v. 20, n. 1, p. e0313151, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0313151>

SILVA, T. C.; LOPES, L. E.; RODRIGUES, D. M. P.; BARBOSA, R. T. AGUILERA, J. G.; STEINER, F. Desempenho agrônômico da soja em resposta ao tratamento da semente com bioestimulantes. **Trends in Agricultural and Environmental Sciences**, p. e240005-e240005, 2024. DOI: <https://doi.org/10.46420/TAES.e240005>

SOBA, D.; ARRESE-IGOR, C.; ARANJUELO, I. Additive effects of heatwave and water stresses on soybean seed yield is caused by impaired carbon assimilation at pod formation but not at flowering. **Plant Science**, v. 321, p. 111320, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2022.111320>

SOLIMAN, A. A.; MOUSA, M. I.; IBRAHIM, M. A.; BAIUMY, K. A.; SHAABAN, S. A.; SHABANA, M. M.; HE, Y. Agronomic and anatomic performance of some soybean genotypes under optimal and water-deficit conditions. **Frontiers in Plant Science**, v. 16, p. 1575180, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1575180>

STRELETSKII, R. A.; ASTAYKINA, A. A.; BELOV, A. A.; CHEPTSOV, V. S.; VETROVA, A. A. Beneficial soil microorganisms and their role in sustainable agriculture. In: Kumar, A.; WHITE, J. F.; SINGH, J. Sustainable Agricultural Practices: A volume in **Plant and Soil Microbiome**. 1. ed. Academic Press, cap. 14, p. 293-333, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-19150-3.00013-8>

SZCZERBA, A.; PŁAŻEK, A.; PASTUSZAK, J.; KOPEĆ, P.; HORNYÁK, M.; DUBERT, F. Effect of low temperature on germination, growth, and seed yield of four soybean cultivars. **Agronomy**, v. 11, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy11040800>

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal**. Artmed Editora, p. 888, 2017

TAVARES, C. A.; JÚNIOR, W. A.; RAMOS, M. L.; PEREIRA, L. M.; CASARI, R. A.; PEREIRA, A. B.; DE SOUSA, C. I.; DA SILVA, A. S.; NETO, S. B.; MERTZ-HENNING, L. Water stress alters morphophysiological, grain quality and vegetation indices of soybean cultivars. **Plants**, v. 11, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants11040559>

TAVARES, G. C.; SANTANA, L. G.; DA SILVA, L. C.; TEIXEIRA, M. B.; DA SILVA, A. S.; CABRAL, J. S.; SOUCHIE, E. D. Morpho-physiological traits of soybean plants in symbiosis with *Gigaspora* sp. and submitted to water restriction. **Scientific Reports**, v. 15, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-92024-6>

TORRES, P.; ALTIER, N.; BEYHAUT, E.; FRESIA, P.; GARAYCOCHEA, S.; ABREO, E. Phenotypic, genomic and in planta characterization of *Bacillus* sensu lato for their phosphorus biofertilization and plant growth promotion features in soybean. **Microbiological Research**, v. 280, p. 127566, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.micres.2023.127566>

VAN GENUCHTEN, M. Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, n. 5, p. 892-898, 1980. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>

VAN GENUCHTEN, M. Th.; LEIJ, F. J.; YATES, S. R. The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, **Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency**, 1992

VIANA, J. S.; TENÓRIO BARROS, C.; BORGES, J. P. G. da S.; SILVA, M. B. G.; GONÇALVES, E. P.; MOURA, M. F. de. Condicionantes para cultivo de soja tolerante ao déficit hídrico no Semiárido Nordeste. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 4, p. 16710413980, 2021. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i4.13980>

VIKRAM, K.; MEENA, S. K.; KUMAR, S.; RANJAN, R.; NIVETHA, N.; PAUL, S. Influence of medium-term application of rhizobacteria on mustard yield and soil properties under different irrigation systems. **Rhizosphere**, v. 22, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2022.100608>

VOGEL, E.; DONAT, M. G.; ALEXANDER, L. V.; MEINSHAUSEN, M.; RAY, D. K.; KAROLY, D.; MEINSHAUSEN, N.; FRIELER, K. The effects of climate extremes on global agricultural yields. **Environmental Research Letters**, v. 14, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab154b>

WALKLEY, A. & BLACK, I. A. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. **Soil Science**, v. 37, n. 1, p. 29-38, 1934

WANG, C.; SUN, A.; JIE ZHU, L.; LIU, M.; ZHANG, Q.; WANG, L. & GAO, X. Drought and rewatering effects on soybean photosynthesis, physiology and yield. **PeerJ**, v. 13, p. e19658, 2025. DOI: <https://doi.org/10.7717/peerj.19658>

WANG, M.; GE, A. H.; MA, X.; WANG, X.; XIE, Q.; WANG, L.; WANG, E. Dynamic root microbiome sustains soybean productivity under unbalanced fertilization. **Nature Communications**, v. 15, n. 1, p. 1668, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-024-45925-5>

WEN, J.; OKYERE, S. K.; WANG, S.; WANG, J.; XIE, L.; RAN, Y.; HU, Y. Endophytic fungi: an effective alternative source of plant-derived bioactive compounds for pharmacological studies. **Journal of Fungi**, v. 8, n. 2, p. 205, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/jof8020205>

WIJESEKARA, T. & XU, B. Health-promoting effects of bioactive compounds from plant endophytic fungi. **Journal of Fungi**, v. 9, n. 10, p. 997, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/jof9100997>

WU, X.; HUANG, Z.; HUANG, C.; LIU, Z.; LIU, J.; CAO, H.; GAO, Y. Regulated Deficit Irrigation Improves Yield Formation and Water and Nitrogen Use Efficiency of Winter Wheat at Different Soil Fertility Levels. **Agronomy**, v. 15, n. 8, p. 1874, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy15081874>

XIE, S.; LEIB, B. G.; FARHADI-MACHEKPOSHTI, M.; GRANT, T. J.; ADOTEY, N.; BUTLER, D. M. Soybean yield response to managed depletion irrigation regimes in a Mid-South silt loam soil. **Agricultural Water Management**, v. 292, p. 108657, 2024

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108657>

XIONG, R.; LIU, S.; CONSIDINE, M. J.; SIDDIQUE, K. H.; LAM, H. M.; CHEN, Y. Root system architecture, physiological and transcriptional traits of soybean (*Glycine max* L.) in response to water deficit: A review. **Physiologia Plantarum**, v. 172, n. 2, p. 405-418, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy12051115>

XU, Y.; KONG, F.; ZHANG, M.; DU, H.; DAI, S.; ZHANG, Z. Effects of initial water and salt content on permeability and microstructure of sodic-saline loessal soils. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 83, n. 12, p. 496, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10064-024-04006-z>

XU, Y.; SONG, D.; QI, X.; ASAD, M.; WANG, S.; TONG, X.; JIANG, Y.; WANG, S. Physiological responses and transcriptome analysis of soybean under gradual water deficit. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1269884>

YANG, L.; SONG, W.; XU, C.; SAPEY, E.; JIANG, D.; WU, C. Effects of high night temperature on soybean yield and compositions. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1065604>

YEREMKO, L.; CZOPEK, K.; STANIAK, M.; MARENYPCH, M.; HANHUR, V. Role of environmental factors in legume–rhizobium symbiosis: A review. **Biomolecules**, v. 15, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/biom15010118>

ZAHEER, M. S.; ALI, H. H.; ERINLE, K. O.; WANI, S. H.; OKON, O. G.; NADEEM, M. A.; RAZA, A. Inoculation of *Azospirillum brasilense* and exogenous application of trans-zeatin riboside alleviates arsenic induced physiological damages in wheat (*Triticum aestivum*). **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 23, p. 33909-33919, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-18106-w>

ZHANG, X.; ZHANG, T.; ZHAO, Y.; JIANG, L.; SUI, X. Structural, extraction and safety aspects of novel alternative proteins from different sources. **Food Chemistry**, v. 436, p. 137712, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137712>

ZHOU, C. WANG, H. ZHU, X. LI, Y. ZHANG, B. TADEGE, M. XIA, Z. Functional genomics: From soybean to legume. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 26, n. 13, p. 6323, 2025. DOI: <https://doi.org/doi.10.3390/ijms26136323>

## CAPÍTULO II

**Qualidade Fisiológica de Sementes de Soja Produzidas sob Diferentes Lâminas de Irrigação e Bioestimulantes em Duas Safras**

**RESUMO** A variabilidade climática e o estresse hídrico no campo alteram o metabolismo da cultura da soja, impactando a qualidade fisiológica da progênie. O objetivo do trabalho foi avaliar o efeito residual (*carry-over*) de tratamentos com bioestimulantes, associados a diferentes lâminas de irrigação sobre a qualidade fisiológica de sementes de soja produzidas a campo. O delineamento experimental foi em blocos casualizados, em arranjo fatorial  $2 \times 5 \times 4$ , correspondendo aos fatores: dois anos agrícolas; cinco lâminas de irrigação (0, 50, 75, 100 e 125%); e quatro bioestimulantes (Rhizotrop 2<sup>®</sup>; Rhizotrop 2<sup>®</sup> + SolubPhos<sup>®</sup>; Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Azotrop<sup>®</sup>; Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Auras<sup>®</sup>). Após a colheita, avaliou-se a qualidade fisiológica das sementes: germinação (G, %), comprimento da parte aérea (CPA, cm), comprimento da radícula (CR, cm), massa seca da parte aérea (MSPA, g), massa seca da radícula (MSR, g) e massa seca de cotilédone (MSC, g). Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e, quando constatada interação significativa entre lâminas de irrigação, bioestimulantes e safras agrícolas, realizou-se análise de regressão ( $p < 0,05$ ). Os resultados evidenciaram que a safra 2024 restringiu severamente o vigor das plântulas em relação ao ano de 2023/24. A ausência de irrigação (lâmina de 0%) diminuiu o poder germinativo e a biomassa inicial em todos os tratamentos. Contudo, o consórcio Rhizotrop 2<sup>®</sup> + SolubPhos<sup>®</sup>, conferiu efeito de *priming* fisiológico transgeracional à progênie, assegurando a estabilidade homeostática do CPA, CR, MSPA e MSR sob lâmina de irrigação 0%, mantendo tecidos densos e vigorosos com menor exaustão das reservas dos cotilédones. Os bioestimulantes Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Azotrop<sup>®</sup> e Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Auras<sup>®</sup> demonstraram dependência de um suprimento hídrico mínimo de 75% para expressar incrementos no vigor. Conclui-se que, a qualidade fisiológica e o vigor das sementes de soja produzidas a campo são fortemente afetados pelo déficit hídrico. O tratamento de sementes com bioestimulantes vem como uma estratégia para mitigar esses danos climáticos. Sob excesso hídrico (125%), a inoculação com Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Auras<sup>®</sup>, confere plasticidade e proteção da raiz. O tratamento Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Azotrop<sup>®</sup> expressa potencial sob disponibilidade moderada de água (75%). O tratamento Rhizotrop 2<sup>®</sup> + SolubPhos<sup>®</sup>, além de aumentar a biomassa secas, atua como um eficiente atenuador de estresse hídrico, otimizando o metabolismo e a conversão energética das sementes produzidas.

**Palavras-chave** *Glycine max*. Bioestimulantes. Déficit Hídrico. Germinação. Vigor de Sementes.

## 1 INTRODUÇÃO

A cultura da soja (*Glycine max* (L.) Merrill) apresenta grande relevância econômica e agrícola, figurando entre as principais commodities produzidas e comercializadas em escala mundial, com expressiva participação no mercado global de proteínas e óleos vegetais (Silva *et al.*, 2025). Nesse contexto, o incremento contínuo da produtividade da cultura assume papel estratégico para produtores rurais e demais elos da cadeia produtiva, estando diretamente associado à sustentabilidade dos sistemas agrícolas em nível global (OCDE/FAO, 2020; Islam, 2025; Li *et al.*, 2026).

Nesse cenário produtivo, as sementes constituem um dos principais insumos para o estabelecimento adequado da lavoura, uma vez que aquelas com elevado potencial fisiológico apresentam maior capacidade germinativa, emergência rápida e uniforme, melhor formação do estande e maior potencial de desenvolvimento das plantas, refletindo diretamente no desempenho inicial e na produtividade da cultura (Shelke *et al.*, 2023; Saraiva *et al.*, 2026).

A qualidade fisiológica das sementes pode ser comprometida ao longo de diferentes etapas do processo produtivo, deste a produção no campo até o beneficiamento, em decorrência das condições edafoclimáticas, manejo da cultura e ocorrência de pragas e doenças (Rao *et al.*, 2023; Silva *et al.*, 2023; De-Santana *et al.*, 2024).

Entre as estratégias de manejo empregadas para favorecer o desenvolvimento das plantas e mitigar os efeitos de condições ambientais adversas, destaca-se a utilização de bioestimulantes à base de microrganismos como *A. brasilense*, *B. japonicum*, *B. subtilis*, *B. megaterium* e *B. aryabhattai*, aplicados de forma individual ou por coinoculação. Entretanto, os efeitos de seu uso associado a diferentes lâminas de irrigação sobre a qualidade das sementes ainda representam uma lacuna científica (Franceschini, Paz e Guimarães 2024; Costa *et al.*, 2026; Mirza *et al.*, 2026).

A disponibilidade hídrica constitui um dos principais fatores ambientais capazes de afetar o desenvolvimento da cultura e o papel fisiológico das sementes. Períodos de estiagem durante fases críticas da lavoura, sobretudo no florescimento e no enchimento dos grãos, podem comprometer a formação e a qualidade final das mesmas (Grahl, Rockenbach e Casassola 2022). Assim, compreender a interação entre lâminas de irrigação e bioestimulantes na produção de sementes, pode contribuir para a melhoria do potencial germinativo e do vigor das sementes de soja.

Nesse sentido, o presente estudo teve como objetivo, avaliar o efeito (*carry-over*)

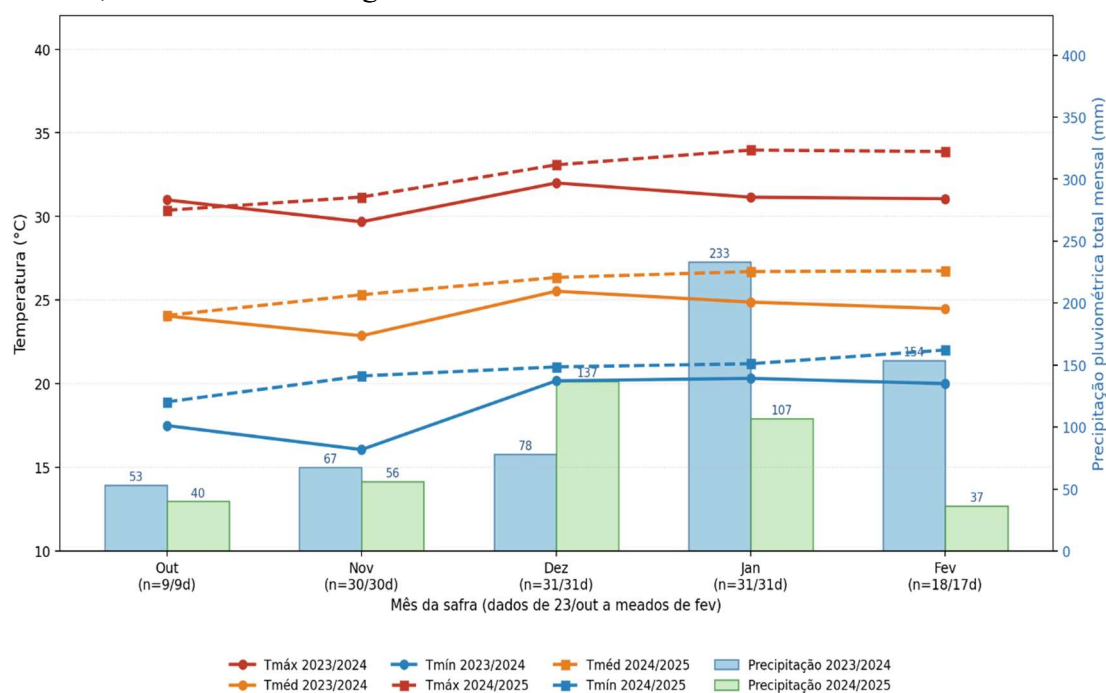
de lâminas de irrigação e bioestimulantes aplicados às plantas, sobre a qualidade fisiológica de sementes de soja produzidas em duas safras na região do Arenito Caiuá.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido na fazenda experimental da Universidade Estadual de Maringá (UEM), Câmpus Umuarama, Paraná, Brasil (23°47'S, 53°18'W, altitude de 430 m). O cultivo da soja foi realizado nas safras agrícolas 2023/2024 e 2024/2025.

A Figura 7 apresenta variação mensal das temperaturas máxima, média e mínima do ar (°C) e a precipitação pluviométrica total mensal (mm) ao longo das safras agrícolas 2023/24 (23/10/2023 a 18/02/2024; n = 119 dias) e 2024/25 (23/10/2024 a 17/02/2025; n = 118 dias), permitindo comparar o regime térmico e hídrico entre os dois ciclos.

**Figura 7.** Temperaturas máxima, média, mínima em °C e precipitação pluviométrica em mm, mensal nas safras agrícolas 2023/24 vs 2024/25 .



Dados diários da estação meteorológica automática câmpus – UEM Umuarama, período coletado, 23/10 a meados de fevereiro em cada safra (2023/24: n = 119 dias; 2024/25: n = 118 dias); Barras = precipitação pluviométrica total mensal – mm, Azul safra 2023/24 e verde safra 2024/25; Temperatura do ar máxima, média e mínima em – °C; Linhas sólidas representam a safra 2023/24 e linhas tracejadas a safra 2024/25;

### 2.1 Tratamento e delineamento experimental

O delineamento experimental adotado foi o de blocos casualizados (DBC), com três repetições, em esquema fatorial triplo  $2 \times 5 \times 4$ . Os fatores experimentais consistiram

em: duas safras agrícolas (2023/24 e 2024/25); cinco lâminas de irrigação (0, 50, 75, 100 e 125% da evapotranspiração da cultura); e quatro bioestimulante via tratamento de sementes. A cultivar de soja utilizada foi a Brasmax Fibra IPRO, semeado em espaçamento de 0,45 m entre linhas e 10 sementes por metro linear, resultando em uma população estimada em 220 mil plantas ha<sup>-1</sup>.

O tratamento das sementes foi realizado no momento da semeadura. Após a contagem, foram tratadas em sacos plásticos visando maior homogeneização do produto e maior aderência as sementes sendo em seguida, transportadas ao campo em caixas de isopor. Os bioestimulantes avaliados foram: (1) Rhizotrop 2<sup>®</sup>, utilizado como tratamento-testemunha, à base de *B. japonicum* SEMIA 5079 e SEMIA 5080, com concentração de  $7 \times 10^9$  UFC mL<sup>-1</sup>, na dose de 1,5 mL kg<sup>-1</sup> de sementes; (2) Rhizotrop 2<sup>®</sup> + SolubPhos<sup>®</sup>, à base de *B. subtilis* (CNPMS B2084 – BRM034840) e *B. megaterium* (CNPMS B119 BRM033112), com concentração de  $4 \times 10^9$  células viáveis mL<sup>-1</sup>, na dose de 2 mL kg<sup>-1</sup> de sementes; (3) Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Azotrop<sup>®</sup>, à base de *A. brasilense* Ab-V5 e Ab-V6, com concentração de  $2 \times 10^8$  UFC mL<sup>-1</sup>, na dose de 2 mL kg<sup>-1</sup> de sementes; (4) Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Auras<sup>®</sup>, à base de *B. aryabhatai* cepa CMAA 1363, com concentração de  $1 \times 10^8$  UFC mL<sup>-1</sup> e dose de 4 mL kg<sup>-1</sup> de sementes. O Rhizotrop 2<sup>®</sup> foi utilizado como tratamento testemunha, por representar uma prática de inoculação convencional amplamente adotada pelos produtores de soja, possibilitando a comparação com os tratamentos contendo associações de diferentes microrganismos.

## 2.2 Avaliação da qualidade fisiológica das sementes

Após a colheita, as sementes provenientes de cada parcela experimental foram encaminhadas, separadamente, ao laboratório de sementes da Universidade Paranaense (UNIPAR), localizado em Umuarama, Paraná, para a determinação da qualidade fisiológica. Inicialmente, as sementes foram submetidas à secagem em estufa com circulação de ar forçada (modelo SL-10/1248), equipada com prateleiras em aço inoxidável, à temperatura de 35 °C durante 48 horas, até atingirem teor de água de aproximadamente 14%. Posteriormente, foram armazenadas a  $23 \pm 1$  °C, em ambiente climatizado por aparelho de ar condicionado, até a realização das avaliações laboratoriais. Essas condições de secagem e armazenamento foram adotadas com objetivo de reduzir a ocorrência de processos deteriorativos e o desenvolvimento de patógenos, preservando a qualidade das sementes até a realização dos testes.

### 2.2.1 Teste de germinação

O teste de germinação foi conduzido com 200 sementes de soja por tratamento, distribuídas em quatro repetições de 50 sementes. Como substrato, utilizou-se papel tipo Germitest® umedecido com água destilada na proporção equivalente a 2,5 vezes a massa do papel seco. As sementes foram contadas utilizando placas contadoras de acrílico, em seguida foram distribuídas sobre duas folhas de papel e cobertas por uma terceira folha. Os conjuntos foram enrolados, fixados com atilhos de borracha separados por tratamentos.

Os rolos foram identificados conforme os respectivos tratamentos e mantidos em germinador com a temperatura constante regulada em  $25 \pm 1$  °C. A avaliação foi realizada aos sete dias após a instalação do teste, conforme as Regras para Análise de Sementes RAS (Brasil, 2025), sendo determinada a porcentagem de plântulas normais.

### 2.2.2 Teste de comprimento de plântulas

O teste de comprimento de plântulas foi conduzido com 80 sementes de soja por tratamento, distribuídas em quatro repetições de 20 sementes. Para a avaliação do crescimento inicial das plântulas, foram selecionadas aleatoriamente 10 plântulas normais de cada repetição. Com auxílio de régua graduada, mensuraram-se os comprimentos de cada parte aérea e da raiz primária (cm plântula<sup>-1</sup>).

Na sequência, as plântulas foram seccionadas com o auxílio de um estilete, separando-se a parte aérea, a radícula e os cotilédones. Cada estrutura foi acondicionada individualmente em sacos de papel e identificado com o tratamento correspondente, em seguida foram secados em estufa (Modelo NT 513, 81 L) à temperatura de 80 °C durante 24 horas para determinação da massa seca. Após a secagem, as amostras foram pesadas em balança de precisão Mettler Toledo® (MR2003/A) com precisão de 0,001 g. Os resultados foram expressos em comprimento médio da parte aérea e da radícula (cm plântula<sup>-1</sup>), massa seca da parte aérea, da radícula e do cotilédone (g plântula<sup>-1</sup>).

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e, quando constatada interação significativa entre lâminas de irrigação, bioestimulantes e safras agrícolas, realizou-se análise de regressão, considerando as lâminas de irrigação como variável independente e as variáveis avaliadas como dependentes. Foram ajustadas curvas de regressão para cada combinação de bioestimulante e safra agrícola, adotando-se 5% de

probabilidade ( $p \leq 0,05$ ). Sendo as variáveis dependentes a Germinação – G, Comprimento da parte aérea – CPA, Comprimento da radícula – CR, Massa seca da parte aérea – MSPA, Massa seca da radícula – MSR e Massa seca dos cotilédones – MSC e as variáveis independentes Fator A – Ano agrícola 2023/24 e 2024/25, Fator B – Lâmina de irrigação e Fator C – Bioestimulante Rhizotrop 2<sup>®</sup>, SolubPhos<sup>®</sup>, Azotrop<sup>®</sup> e Auras<sup>®</sup>

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 10. apresenta o resumo da análise de variância (valores de F calculado), em delineamento de blocos casualizados (DBC), fatorial  $2 \times 5 \times 4$ , para os efeitos principais do ano de cultivo (A), da lâmina de irrigação (B) e bioestimulantes (C), bem como de suas interações duplas ( $A \times B$ ,  $A \times C$  e  $B \times C$ ) e da interação tripla ( $A \times B \times C$ ), sobre a germinação (G) e as características de crescimento de plântulas de soja, comprimento da parte aérea e da radícula (CPA e CR), massa seca da parte aérea, da radícula e do cotilédone (MSPA, MSR e MSC).

A análise conjunta dos efeitos principais e das interações de segunda e terceira ordem tem como objetivo verificar se a resposta da planta aos bioestimulantes e à lâmina de irrigação se mantém constante entre os anos avaliados ou se é modulada pela interação entre esses fatores.

**Tabela 10.** Análise de variância da variável Germinação (G, %), comprimento de parte aérea (CPA, cm plantla<sup>-1</sup>), comprimento da radícula (CR, cm planta<sup>-1</sup>), massa seca da parte área, (MSPA, g plantla<sup>-1</sup>), massa seca da radícula (MSR, g planta<sup>-1</sup>), massa seca do cotilédone (MSC, g planta<sup>-1</sup>) sementes de soja produzidas sob lâminas de irrigação e bioestimulantes, dois anos agrícola (2023/24 e 2024/25) no Arenito Caiuá Umuarama PR.

| Varição        | GL | G      | CPA      | CR       | MSPA     | MSR      | MSC     |
|----------------|----|--------|----------|----------|----------|----------|---------|
| Fator A        | 1  | 0,19ns | 318,19** | 275,05** | 106,56** | 317,40** | 6,18*   |
| Fator B        | 4  | 2,86** | 15,31**  | 24,08**  | 16,39**  | 26,94**  | 15,76** |
| Fator C        | 3  | 6,05** | 2,09ns   | 0,77ns   | 0,58ns   | 1,31ns   | 1,15ns  |
| Int. A x B     | 4  | 9,46** | 1,66ns   | 4,60**   | 4,73**   | 12,88**  | 10,09** |
| Int. A x C     | 3  | 2,46ns | 1,35ns   | 1,61ns   | 4,08**   | 4,33**   | 6,05**  |
| Int. B x C     | 12 | 2,10*  | 1,70ns   | 2,34*    | 3,56**   | 4,96**   | 4,12**  |
| Int. A x B x C | 12 | 2,68** | 2,75**   | 3,47**   | 2,90**   | 4,24**   | 1,75ns  |
| Resíduo        | 80 | -      | -        | -        | -        | -        | -       |
| CV (%)         | -  | 21,33  | 20,77    | 22,70    | 32,60    | 30,52    | 29,48   |

GL – graus de liberdade; os valores correspondem ao F calculado pelo teste F da ANOVA; \* e \*\* indicam significância a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F; ns – não significativo ( $p \geq 0,05$ ); G – germinação; CPA – comprimento da parte aérea; CR – comprimento da radícula; MSPA – massa seca da parte aérea; MSR – massa seca da radícula; MSC – massa do cotilédone; CV (%) – coeficiente de

variação; **Fator A** – ano agrícola; **Fator B** – lâmina de irrigação; **Fator C** – bioestimulantes.

A ausência de efeito significativo de blocos nas seis variáveis avaliadas ( $p > 0,34$ ), constitui um resultado favorável do ponto de vista metodológico, indicando que a variação de campo entre blocos foi pequena e que as diferenças observadas entre tratamentos não são confundidas com heterogeneidade ambiental não controlada, reforçando a validade interna do experimento conforme os princípios de delineamento em blocos casualizados (Ferreira, 2011; Colet, *et al.*, 2025).

Entre os efeitos principais, a lâmina de irrigação (Fator B) foi a variação mais consistente, com efeito altamente significativo ( $p < 0,01$ ) sobre as variáveis, comprovando como o principal determinante do desempenho fisiológico da semente no experimento, resultado que está em concordância com estudos recentes que apontam a disponibilidade hídrica como o principal fator regulador da qualidade fisiológica de sementes de soja (Pereira *et al.*, 2023).

O ano de cultivo (Fator A), também exerceu efeito expressivo sobre os parâmetros de crescimento (CPA e CR), massa seca (MSPA e MSR,  $p < 0,01$ ) e sobre a massa seca de cotilédone (MSC,  $p < 0,05$ ), mas não influenciou a germinação (G;  $p = 0,665$ ), padrão biologicamente coerente, já que a germinação tende a ser mais estável entre safras que os parâmetros de crescimento pós-germinativo, achado semelhante ao relatado em avaliações de sementes de soja ao longo de diferentes safras agrícolas (Oliveira Filho *et al.*, 2025). Já o uso de bioestimulantes (Fator C), isoladamente, afetou apenas a germinação ( $p < 0,01$ ), sem efeito aparente sobre as demais variáveis quando considerada de forma isolada dos demais fatores.

O resultado mais relevante para a discussão, é a significância da interação tripla  $A \times B \times C$  em cinco das seis variáveis (G, CPA, CR, MSPA e MSR,  $p < 0,01$ ), evidenciando que o efeito conjunto da lâmina de irrigação e bioestimulante sobre a qualidade fisiológica de sementes, não é constante entre os anos avaliados, uma modulação estatisticamente robusta que justifica e recomenda o desdobramento dos efeitos simples na sequência da análise, em linha com a recomendação de estudos que discutem interações complexas entre genótipo/ano e ambiente em soja (Maia, 2014).

O padrão de interação da massa de cotilédone (MSC) também chama a atenção, embora o (Fator C) isoladamente não seja significativo  $p = 0,341$ , suas interações com ano (A)  $p = 0,001$  e lâmina (B)  $p < 0,001$ , revelam que o efeito da bioestimulação sobre a reserva do cotilédone é condicional ao ano e à lâmina, padrão semelhante ao relatado para

inoculação com *A. brasilense* em soja, cuja significância varia conforme o local e o ano de condução do experimento, um efeito frequentemente descrito como dependente de "site-year" (site-year interaction) (De-Borja Reis, *et al.*, 2022; Marchão, *et al.*, 2025).

### 3.1 Interação Safra × Tratamento biológico

Para as variáveis morfométricas e de biomassa, a interação entre safra agrícola e tratamento com bioestimulantes também se mostrou significativa ( $p < 0,05$ ) na (Tabela. 11), demonstrando que o potencial promotor de crescimento dos microrganismos, foi modulado pelas variações climáticas interanuais ocorridas durante o ciclo da planta-mãe.

**Tabela 11.** Germinação e variáveis biométricas de plântulas de soja, oriundas de sementes tratadas com bioestimulantes promotores de crescimento nas safras 2023/24 e 2024/25, Umuarama, PR.

| Variáveis avaliadas         | Ano safra | Tratamento de sementes (Bioestimulantes) |                                                   |                                                 |                                               |
|-----------------------------|-----------|------------------------------------------|---------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
|                             |           | Rhizotrop 2 <sup>®</sup>                 | Rhizotrop 2 <sup>®</sup> + SolubPhos <sup>®</sup> | Rhizotrop 2 <sup>®</sup> + Azotrop <sup>®</sup> | Rhizotrop 2 <sup>®</sup> + Auras <sup>®</sup> |
| Germinação <sup>1</sup> (%) | 2023/24   | 55,87 aA                                 | 45,73 aA                                          | 48,40 aA                                        | 50,80 aA                                      |
|                             | 2024/25   | 56,13 aA                                 | 52,66 aA                                          | 40,93 aB                                        | 54,53 aA                                      |
| CPA <sup>2</sup> (cm)       | 2023/24   | 12,42 aA                                 | 12,58 aA                                          | 12,15 aA                                        | 12,46 aA                                      |
|                             | 2024/25   | 5,16 bB                                  | 6,66 bA                                           | 5,59 bB                                         | 7,11 bA                                       |
| CR <sup>3</sup> (cm)        | 2023/24   | 10,03 aA                                 | 10,55 aA                                          | 9,95 aA                                         | 9,35 aA                                       |
|                             | 2024/25   | 4,38 bA                                  | 5,70 bA                                           | 4,62 bA                                         | 5,40 bA                                       |
| MSPA <sup>4</sup> (g)       | 2023/24   | 0,23 aB                                  | 0,26 aA                                           | 0,23 aB                                         | 0,20 aB                                       |
|                             | 2024/25   | 0,11 bA                                  | 0,11 bA                                           | 0,12 bA                                         | 0,15 bA                                       |
| MSR <sup>5</sup> (g)        | 2023/24   | 0,03 aB                                  | 0,04 aA                                           | 0,03 aB                                         | 0,03 aB                                       |
|                             | 2024/25   | 0,01 bA                                  | 0,01 bA                                           | 0,01 bA                                         | 0,01 bA                                       |
| MSC <sup>6</sup> (g)        | 2023/24   | 0,50 aA                                  | 0,58 aA                                           | 0,55 aA                                         | 0,42 bB                                       |
|                             | 2024/25   | 0,38 bB                                  | 0,40 bB                                           | 0,47 aA                                         | 0,54 aA                                       |

Médias seguidas de letra minúscula entre linhas na vertical e letra maiúscula entre colunas na horizontal, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% (ou 0.05) de probabilidade.<sup>1</sup>G – Germinação; <sup>2</sup>CPA – Comprimento da parte aérea; <sup>3</sup>CR – Comprimento da radícula; <sup>4</sup>MSPA – Massa seca da parte aérea; <sup>5</sup>MSR – Massa seca da radícula; <sup>6</sup>MSC – Massa seca de cotilédones; Rhizotrop 2<sup>®</sup> – *B. japonicum*; Rhizotrop2<sup>®</sup> + SolubPhos<sup>®</sup> – *B. japonicum* + *B. subtilis* + *B. megaterium*; Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Azotrop – *B. japonicum* + *A. brasilense*; Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Auras<sup>®</sup> – *B. japonicum* + *B. aryabhattai*.

Na safra 2023/24, caracterizada por condições edafoclimáticas favoráveis, os bioestimulantes não exerceram influência significativa sobre a germinação, o CPA e o CR, assemelhando-se estatisticamente à testemunha ( $p > 0,05$ ). Essa ausência de resposta diferencial em anos climaticamente favoráveis é recorrente na interação planta-Bioestimulante. Conforme Marcos Filho (2015), sob condições ideais de campo, a planta-

mãe expressa seu potencial máximo de forma independente, e o efeito dos bioestimulantes tende a ser mascarado, uma vez que a testemunha já atinge patamares elevados de vigor.

Contudo, mesmo nesse cenário favorável, o tratamento Rhizotrop 2<sup>®</sup> + SolubPhos<sup>®</sup> demonstrou superioridade metabólica, proporcionando os maiores valores de (MSPA) (0,26 g) e (MSR) (0,04 g), isolando-se estatisticamente dos demais. Segundo Azeem *et al.*, (2023), essa maior alocação de carbono estrutural decorre do sinergismo funcional entre as espécies de *Bacillus*: enquanto *B. subtilis* sinaliza vias hormonais de crescimento via síntese de auxinas e giberelinas, *B. megaterium* incrementa a solubilização de fósforo estrutural, resultando em tecidos mais densos e maior densidade radicular.

Na safra 2024/25, sob condições ambientais restritivas evidenciadas pelo decréscimo generalizado de crescimento e biomassa, o papel protetor dos tratamentos biológicos tornou-se proeminente. Para o CPA, os tratamentos Rhizotrop 2<sup>®</sup> (5,16 cm), Rhizotrop 2<sup>®</sup> + SolubPhos<sup>®</sup> (6,66 cm) e Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Auras<sup>®</sup> (7,11 cm) superaram significativamente Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Azotrop<sup>®</sup> (5,59 cm). Esse estímulo ao alongamento celular sob estresse ambiental corrobora Peter *et al.*, (2024), que atribuem ao gênero *Bacillus* a capacidade de induzir tolerância sistêmica ao estresse (IST, 2021).

Por serem bactérias Gram-positivas esporulantes, seus endósporos mantêm-se viáveis e metabolicamente ativos sob flutuações térmicas e hídricas extremas no solo, promovendo a síntese de fitormônios e osmorreguladores que atenuam danos oxidativos no embrião. Esse efeito protetor correlacionou-se diretamente com a manutenção do aporte energético das plântulas. Na safra 2024/25, os tratamentos Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Azotrop<sup>®</sup> e Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Auras<sup>®</sup> e (0,47 e 0,54 g, respectivamente) apresentaram maior massa seca de cotilédones em relação à testemunha (0,38 g), indicando que a simbiose estabelecida no campo atenuou o estresse sofrido pela planta-mãe na fase reprodutiva.

De acordo com Fukami, Cerezini e Hungria (2018); Krzyzanowski, Dias e França-Neto (2022), microrganismos eficientes promovem a estabilização da relação fonte-dreno: *A. Brasilense* estimula a atividade de enzimas ligadas à assimilação de nitrogênio e, sob restrição, otimiza o fluxo de aminoácidos para as sementes, garantindo um transporte mais eficiente de aminoácido para as semnetes. Esse mecanismo fisiológico reflete-se diretamente no ganho de massa e densidade dos cotilédones.

Dessa forma, o uso de bioinsumos indutores de crescimento atenua os impactos das flutuações climáticas adversas na planta-mãe, agindo como um mecanismo de proteção biológica. Como resultado, há uma otimização no acúmulo de compostos

energéticos nos tecidos de reserva da semente, o que determina o potencial de arranque e vigor da cultura na safra posterior, garantindo sementes com reservas energéticas superiores e determinantes para o estabelecimento vigoroso da cultura em safras subsequentes (Zhao *et al.*, 2022; Calderon *et al.*, 2025).

### 3.2 Interação Lâmina de irrigação × Tratamento biológico: Germinação – G

A análise de variância revelou interação significativa entre lâmina de irrigação e bioestimulante ( $p < 0,05$ ) para a germinação avaliado na (Tabela 12), evidenciando que a eficiência dos microrganismos promotores de crescimento depende diretamente da disponibilidade hídrica do solo.

**Tabela 12.** Germinação (%) de plântulas de soja oriundas de sementes tratadas com bioestimulantes sob diferentes lâminas de irrigação (dados combinados das safras 2023/24 e 2024/25), Umuarama, PR.

| Lâmina de Irrigação % | Tratamento de sementes (Bioestimulantes) |                                                   |                                                 |                                               |
|-----------------------|------------------------------------------|---------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
|                       | Rhizotrop 2 <sup>®</sup>                 | Rhizotrop 2 <sup>®</sup> + SolubPhos <sup>®</sup> | Rhizotrop 2 <sup>®</sup> + Azotrop <sup>®</sup> | Rhizotrop 2 <sup>®</sup> + Auras <sup>®</sup> |
| 0                     | 32,66 cA                                 | 25,66 bA                                          | 16,00 cB                                        | 18,00 cB                                      |
| 50                    | 63,66 aA                                 | 46,66 aB                                          | 44,00 bB                                        | 50,00 bB                                      |
| 75                    | 70,00 aA                                 | 57,66 aA                                          | 63,33 aA                                        | 62,33 aA                                      |
| 100                   | 51,33 bA                                 | 55,66 aA                                          | 53,66 aA                                        | 65,66 aA                                      |
| 125                   | 62,33 aA                                 | 60,33 aA                                          | 46,33 bB                                        | 67,33 aA                                      |

Médias seguidas de letra minúscula entre linhas na vertical e letra maiúscula entre colunas na horizontal; não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% (ou 0.05) de probabilidade. Rhizotrop 2<sup>®</sup> – *B. japonicum*; Rhizotrop2<sup>®</sup> + SolubPhos<sup>®</sup> – *B. japonicum* + *B. subtilis* + *B. megaterium*; Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Azotrop – *B. japonicum* + *A. Brasilense*; Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Auras<sup>®</sup> – *B. japonicum* + *B. aryabhattai*.

Sob déficit hídrico severo (lâmina de 0%), as sementes oriundas dos tratamentos Rhizotrop 2<sup>®</sup> e Rhizotrop 2<sup>®</sup> + SolubPhos<sup>®</sup> (32,66 e 25,66%, respectivamente) apresentaram maior viabilidade em relação àquelas inoculadas com Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Azotrop<sup>®</sup> e Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Auras<sup>®</sup> (16,00 e 18,00%). Comportamento análogo observado na lâmina de 50%, onde a testemunha (63,66%) superou os demais tratamentos.

De acordo com Fukami, Cerezini e Hungria (2018), a associação planta-microrganismo não é isenta de custos energéticos: a planta direciona fração significativa de seus fotoassimilados na forma de exsudatos radiculares, para manter a população bacteriana na rizosfera. Em cenários de déficit hídrico, o fechamento estomático reduz a taxa fotossintética. Nessa condição, o custo energético de manutenção dos microrganismos sobrecarrega temporariamente o metabolismo da planta-mae, reduzindo a partição de fotoassimilados no preenchimento das sementes, justificando a superioridade germinativa da testemunha nesses níveis hídricos (Krzyzanowski, Dias e

França-Neto, 2022). Entretanto, essa desvantagem é compensada no incremento no vigor das plântulas, conforme demonstrado nas variáveis morfológicas subsequentes.

Na lâmina de 75%, considerando o ponto ideal hídrico e fisiológico de campo, as diferenças entre os bioestimulantes e a testemunha foram suprimidas ( $p > 0,05$ ), com taxas de germinação variando de 57,66 a 70,00%. Conforme Marcos Filho (2015), em ambientes com disponibilidade hídrica, a planta atinge seu potencial fisiológico pleno, equalizando a uniformidade e o vigor das sementes independente do tratamento biológico. Ademais, conforme Calderon *et al.*, (2025), bactérias Gram-negativas e não esporulantes como *Azospirillum*, necessitam de umidade no solo para expressar sua atividade metabólica. Na lâmina de 75%, o Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Azotrop<sup>®</sup> atingiu seu pico de eficiência, otimizando o suprimento nitrogenado e hormonal.

Nas lâminas superiores, consolidou-se o potencial adaptativo do gênero *Bacillus*. Na lâmina de 100%, o tratamento Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Auras<sup>®</sup> estabilizou a viabilidade das sementes em 65,66%, superando a testemunha (51,33%). Esse efeito protetor estendeu-se à lâmina de 125%, onde Rhizotrop 2<sup>®</sup> + SolubPhos<sup>®</sup> (60,33%) e Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Auras<sup>®</sup> (67,33%) preservaram a qualidade das sementes, enquanto Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Azotrop<sup>®</sup> decresceu significativamente (46,33%).

A saturação hídrica induz hipóxia radicular, acelerando a síntese de espécies reativas de oxigênio (EROs) e de etileno estressor, com consequente redução da viabilidade embrionária. Estirpes de *B. aryabhattai* possuem a capacidade de secretar ACC deaminase e induzir defesas antioxidantes na planta-mãe, atenuando quimicamente o estresse oxidativo (Shaffique *et al.*, 2023; Peter *et al.*, 2024; Costa *et al.*, 2026).

Por serem microrganismos Gram-positivos esporulantes, essas bactérias possuem elevada viabilidade sob condições edafoclimáticas adversas e flutuações nos níveis de oxigênio. Consequentemente, há uma continuidade na síntese de fitormônios e na disponibilização de nutrientes, o que potencializa o vigor e a qualidade sanitária das sementes de soja (AL-Tammar; Khalifa, 2022; Galbieri *et al.*, 2023)

### 3.3 Interação Lâmina × Tratamento: Comprimento da parte aérea – CPA

O comprimento da parte aérea (CPA), respondeu de forma significativa à interação lâmina x tratamento ( $p < 0,05$ ) (Tabela 13), evidenciando o papel dos bioestimulantes na atenuação do estresse abiótico via estímulo ao alongamento celular.

**Tabela 13.** Comprimento da parte aérea (cm) de plântulas de soja, oriundas de sementes tratadas com bioestimulantes sob diferentes lâminas de irrigação, Umuarama, PR.

| Lâmina de Irrigação % | Tratamento de sementes (Bioestimulantes) |                                                   |                                                 |                                               |
|-----------------------|------------------------------------------|---------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
|                       | Rhizotrop 2 <sup>®</sup>                 | Rhizotrop 2 <sup>®</sup> + SolubPhos <sup>®</sup> | Rhizotrop 2 <sup>®</sup> + Azotrop <sup>®</sup> | Rhizotrop 2 <sup>®</sup> + Auras <sup>®</sup> |
| 0                     | 4,98 bB                                  | 8,50 aA                                           | 5,62 cB                                         | 7,35 bA                                       |
| 50                    | 10,16 aA                                 | 9,92 aA                                           | 7,88 bA                                         | 10,15 aA                                      |
| 75                    | 10,56 aA                                 | 9,98 aA                                           | 11,20 aA                                        | 10,08 aA                                      |
| 100                   | 9,13 aA                                  | 10,96 aA                                          | 10,05 aA                                        | 10,58 aA                                      |
| 125                   | 9,12 aA                                  | 8,73 aA                                           | 9,62 aA                                         | 10,76 aA                                      |

Médias seguidas de letra minúscula entre linhas na vertical e letra maiúscula entre colunas na horizontal, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% (ou 0.05) de probabilidade. Rhizotrop 2<sup>®</sup> – *B. japonicum*; Rhizotrop2<sup>®</sup> + SolubPhos<sup>®</sup> – *B. japonicum* + *B. subtilis* + *B. megaterium*; Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Azotrop – *B. japonicum* + *A. Brasilense*; Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Auras<sup>®</sup> – *B. japonicum* + *B. aryabhattai*.

O efeito indutor de vigor tornou-se proeminente sob déficit hídrico na (lâmina de 0%), sementes tratadas com Rhizotrop 2<sup>®</sup> + SolubPhos<sup>®</sup> e Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Auras<sup>®</sup> originaram plântulas com CPA de 8,50 e 7,35 cm, respectivamente, valores significativamente superiores aos de Rhizotrop 2<sup>®</sup> (4,98 cm) e Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Azotrop<sup>®</sup> (5,62 cm). Esses resultados esclarece o aparente paradoxo observado na germinação (Tabela 11), onde a testemunha apresentou maior percentual germinativo na lâmina 0%.

Embora menos sementes tenham germinado sob o efeito dos *Bacillus* em déficit hídrico, as plântulas emergentes apresentaram vigor de crescimento quase duas vezes superior ao Rhizotrop 2<sup>®</sup>. De acordo com Marcos Filho (2015); França-Neto *et al.*, (2018); Yu, Chao e Zhao (2024), o vigor inicial de sementes é mensurado pela capacidade de transferir energia, de forma rápida e eficiente para o eixo embrionário.

A inoculação com *Bacillus* induziu alterações fisiológicas benéficas na semente, impulsionando a velocidade de mobilização de reservas cotiledonares e ativando as taxas de divisão e expansão celular nos meristemas apicais, mesmo sob déficit hídrico (Ghassemi-Golezani; Lotfi, 2013; Shaffique *et al.*, 2023).

No desdobramento das lâminas dentro de cada bioestimulante, o tratamento Rhizotrop 2<sup>®</sup> + SolubPhos<sup>®</sup> demonstrou notável estabilidade homeostática, mantendo o CPA estatisticamente inalterado em todas as amplitudes hídricas avaliadas (8,50 a 10,96 cm, de 0 a 125%). Conforme Galbieri *et al.*, (2023); Peter *et al.*, (2024), essa estabilidade fenotípica é atribuída à capacidade de formação de endósporos duráveis, que protegem as colônias bacterianas contra oscilações extremas de umidade e temperatura, garantindo suporte hormonal e nutricional constante à soja ao longo de todo o ciclo.

O tratamento Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Azotrop<sup>®</sup>, embora prejudicado na lâmina de 0%, demonstrou alta capacidade responsiva ao incremento hídrico, atingindo o ápice na

lâmina de 75% (11,20 cm). Fisiologicamente, *A. brasilense* atua na síntese de ácido indol-3-acético (AIA), fitormônio diretamente responsável pelo alongamento celular. Contudo, por ser Gram-negativa, sofre desidratação celular sob déficit hídrico, bloqueando temporariamente suas rotas de síntese hormonal (Fukami, Cerezini, Hungria, 2018; Naoe *et al.*, 2021). Ao dispor de umidade adequada, sua atividade metabólica é plenamente restabelecida, promovendo liberação abundante de auxinas que estimula a expansão celular (Calderon *et al.*, 2025).

### 3.4 Interação Lâmina × Tratamento Comprimento da radícula – CR

O comprimento da radícula (CR), também foi significativamente influenciado pela interação lâmina × tratamento bioestimulante ( $p < 0,05$ ) (Tabela 14), demonstrando que os resultados obtidos da radícula, evidenciaram que o potencial promotor de crescimento dos bioestimulantes oscila conforme o regime hídrico do solo, demonstrando que o sucesso dessa tecnologia, depende diretamente de condições de umidade favoráveis no ambiente radicular.

**Tabela 14.** Comprimento da radícula (cm) de plântulas de soja oriundas de sementes tratadas com bioestimulantes sob diferentes lâminas de irrigação, Umuarama, PR.

| Lâmina de Irrigação % | Tratamento de sementes (Bioestimulantes) |                                                   |                                                 |                                               |
|-----------------------|------------------------------------------|---------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
|                       | Rhizotrop 2 <sup>®</sup>                 | Rhizotrop 2 <sup>®</sup> + SolubPhos <sup>®</sup> | Rhizotrop 2 <sup>®</sup> + Azotrop <sup>®</sup> | Rhizotrop 2 <sup>®</sup> + Auras <sup>®</sup> |
| 0                     | 0,07 bB                                  | 6,28 bA                                           | 3,33 bB                                         | 4,90 bA                                       |
| 50                    | 0,21 aA                                  | 9,20 aA                                           | 7,75 aA                                         | 8,43 aA                                       |
| 75                    | 0,22 aA                                  | 7,65 bA                                           | 8,43 aA                                         | 6,02 bB                                       |
| 100                   | 0,16 aA                                  | 8,56 aA                                           | 8,95 aA                                         | 8,73 aA                                       |
| 125                   | 0,18 aA                                  | 7,36 bA                                           | 7,95 aA                                         | 8,78 aA                                       |

Médias seguidas de letra minúscula entre linhas na vertical e letra maiúscula entre colunas na horizontal, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% (ou 0.05) de probabilidade. Rhizotrop 2<sup>®</sup> – *B. japonicum*; Rhizotrop2<sup>®</sup> + SolubPhos<sup>®</sup> – *B. japonicum* + *B. subtilis* + *B. megaterium*; Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Azotrop – *B. japonicum* + *A. Brasilense*; Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Auras<sup>®</sup> – *B. japonicum* + *B. aryabhattai*.

Sob déficit hídrico na (lâmina de 0%), os tratamentos Rhizotrop 2<sup>®</sup> + SolubPhos<sup>®</sup> e Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Auras<sup>®</sup> proporcionaram comprimentos radiculares de 6,28 e 4,90 cm respectivamente, superiores ao Rhizotrop 2<sup>®</sup> e Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Azotrop<sup>®</sup> (3,35 e 3,33 cm). Esse expressivo alongamento radicular inicial sob restrição hídrica, constitui um clássico mecanismo de escape morfológico ao estresse osmótico, mediado pela modulação hormonal na zona de alongação celular. Sementes dotadas de alto vigor, direcionam suas reservas energéticas prioritariamente para o crescimento axial da raiz primária, conferindo vantagem adaptativa, permitindo a exploração de camadas profundas do solo

em busca de água (Azeem *et al.*, 2023; Peter *et al.*, 2024; Yu, Chao e Zhao, 2024).

O tratamento Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Auras<sup>®</sup> revelou notável plasticidade fenotípica, mantendo o CR maximizado e estável de 50 a 125% (8,43 a 8,78 cm). Essa estabilidade sob excesso hídrico, evidencia a capacidade de *B. aryabhattai* mitigar os efeitos deletérios da hipóxia radicular. Solos saturados interrompem a respiração celular e geram surto de EROs e etileno estressor, paralisando o crescimento meristemático. Conforme Mun *et al.*, (2024); Calderon *et al.*, (2025), *B. aryabhattai* atenua esse estresse mediante produção de ACC deaminase e regulação positiva do sistema antioxidante (superóxido dismutase e catalase), protegendo as células do meristema apical radicular e permitindo o alongamento mesmo em solos temporariamente saturados.

Nas lâminas de 50 e 100%, as diferenças entre tratamentos foram suprimidas ( $p > 0,05$ ), demonstrando que, sob conforto hídrico, a soja expressa sua taxa de crescimento radicular de forma autônoma. O papel dos bioestimulantes sobre a morfologia radicular torna-se, portanto, verdadeiramente crítico em cenários limítrofes, onde a simbiose compensa as limitações físicas do ambiente (Fukami, Cerezini, Hungria, 2018; Krzyzanowski, Dias, França-Neto, 2022;).

### 3.5 Interação Lâmina × Tratamento: Massa seca da parte aérea – MSPA

A massa seca da parte aérea (MSPA) apresentou dependência significativa da interação lâmina de irrigação x tratamento ( $p < 0,05$ ) (Tabela 15), evidenciando que o acúmulo de biomassa aérea das plântulas, resulta da ação conjunta entre lâmina de irrigação e os bioestimulantes.

**Tabela 15.** Massa seca da parte aérea (g plântula<sup>-1</sup>) de plântula de soja oriundas de sementes tratadas com bioestimulantes e diferentes lâminas de irrigação, Umuarama, PR.

| Lâmina de Irrigação % | Tratamento de sementes (Bioestimulantes) |                                                   |                                                 |                                               |
|-----------------------|------------------------------------------|---------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
|                       | Rhizotrop 2 <sup>®</sup>                 | Rhizotrop 2 <sup>®</sup> + SolubPhos <sup>®</sup> | Rhizotrop 2 <sup>®</sup> + Azotrop <sup>®</sup> | Rhizotrop 2 <sup>®</sup> + Auras <sup>®</sup> |
| 0                     | 0,07 bB                                  | 0,17 aA                                           | 0,06 bB                                         | 0,07 bB                                       |
| 50                    | 0,21 aA                                  | 0,18 aA                                           | 0,16 aA                                         | 0,21 aA                                       |
| 75                    | 0,22 aA                                  | 0,16 aB                                           | 0,23 aA                                         | 0,11 bB                                       |
| 100                   | 0,16 aA                                  | 0,23 aA                                           | 0,21 aA                                         | 0,21 aA                                       |
| 125                   | 0,18 aA                                  | 0,20 aA                                           | 0,21 aA                                         | 0,25 aA                                       |

Médias seguidas de letra minúscula entre linhas na vertical e letra maiúscula entre colunas na horizontal, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% (ou 0.05) de probabilidade. Rhizotrop 2<sup>®</sup> – *B. japonicum*; Rhizotrop2<sup>®</sup> + SolubPhos<sup>®</sup> – *B. japonicum* + *B. subtilis* + *B. megaterium*; Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Azotrop – *B. japonicum* + *A. Brasilense*; Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Auras<sup>®</sup> – *B. japonicum* + *B. aryabhattai*.

O resultado de maior expressividade biológica foi observado na lâmina de 0%, o consórcio Rhizotrop 2<sup>®</sup> + SolubPhos proporcionou acúmulo de 0,17 g, valor que representa quase o triplo da biomassa registrada nos demais tratamentos (Rhizotrop 2<sup>®</sup>, Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Azotrop<sup>®</sup> e Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Auras<sup>®</sup>: 0,07, 0,06 e 0,07 g, respectivamente). Esse acúmulo massivo de tecidos sob déficit hídrico, confirma que o bioestimulante esporulante atuou na planta-mãe, mitigando o estresse osmótico e salvaguardando a integridade do aparato fotossintético durante o enchimento de grãos.

Conforme Shaffique *et al.*, (2023); Mun *et al.*, (2024) e Yu, Cha e Zha (2024), a coinoculação com *Bacillus* desencadeia indução de tolerância sistêmica ao estresse (IST, 2021), estimulando a síntese de osmorreguladores (prolina) e reduzindo o estresse oxidativo. Esse ajuste bioquímico, impede o colapso celular e mantém as taxas de translocação de amido e proteínas ativas em direção aos drenos reprodutivos, gerando sementes com alta densidade e capacidade de conversão metabólica inicial, em alinhamento com os pressupostos clássicos de vigor (Marcos Filho, 2015; França-Neto *et al.*, 2022; Renzetti *et al.*, 2024; Pandit *et al.*, 2026;).

No desdobramento das lâminas dentro de cada bioestimulante, Rhizotrop 2<sup>®</sup> + SolubPhos<sup>®</sup> exibiu estabilidade fenotípica com acúmulo de MSPA constante, desde a ausência de irrigação (0,17 g na lâmina 0%) até o excesso (0,20 g na lâmina de 125%), sem variação estatística. Essa resiliência é explicada pela capacidade dos endósporos de *Bacillus* tolerar flutuações extremas de umidade, temperatura e oxigênio no solo, mantendo o fornecimento constante de fitormônios e nutrientes à soja (Galbieri, 2023; Setlow e Christie, 2023).

Na lâmina de 75%, os tratamentos Rhizotrop 2<sup>®</sup> e Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Azotrop<sup>®</sup> (0,22 e 0,23 g) foram superiores a Rhizotrop 2<sup>®</sup> + SolubPhos<sup>®</sup> e Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Auras<sup>®</sup> e (0,16 e 0,11 g). Fisiologicamente, *A. brasilense* atua na fixação biológica de nitrogênio e regulação da enzima nitrato redutase; sob disponibilidade hídrica moderada e sem os custos energéticos de estresses extremos, seu metabolismo opera em máxima sinergia com a fisiologia da soja, otimizando o fluxo de compostos nitrogenados estruturais para a parte aérea (Shaymullina *et al.*, 2024; Calderon *et al.*, 2025).

### 3.6 Interação Lâmina × Tratamento: Massa seca de radícula – MSR

Para a massa seca da radícula (MSR) a interação entre lâminas de irrigação x bioestimulantes também revelou significância ( $p < 0,05$ ) (tabela 16), confirmando que a

qualidade e o vigor das sementes de soja são diretamente modulados pela combinação entre o regime hídrico e a inoculação por bioestimulante.

**Tabela 16.** Massa seca da radícula (g plântula<sup>-1</sup>) de plântulas de soja oriundas de sementes tratadas com bioestimulantes sob diferentes lâminas de irrigação, Umuarama, PR.

| Lâmina de Irrigação % | Tratamento de sementes (Bioestimulantes) |                                                   |                                                 |                                               |
|-----------------------|------------------------------------------|---------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
|                       | Rhizotrop 2 <sup>®</sup>                 | Rhizotrop 2 <sup>®</sup> + SolubPhos <sup>®</sup> | Rhizotrop 2 <sup>®</sup> + Azotrop <sup>®</sup> | Rhizotrop 2 <sup>®</sup> + Auras <sup>®</sup> |
| 0                     | 0,00 cB                                  | 0,02 aA                                           | 0,01 cB                                         | 0,00 cB                                       |
| 50                    | 0,03 aA                                  | 0,03 aA                                           | 0,02 bA                                         | 0,03 aA                                       |
| 75                    | 0,03 aA                                  | 0,02 aB                                           | 0,03 aA                                         | 0,01 bB                                       |
| 100                   | 0,02 bB                                  | 0,03 aA                                           | 0,03 aA                                         | 0,03 aA                                       |
| 125                   | 0,03 aA                                  | 0,03 aA                                           | 0,02 bA                                         | 0,03 aA                                       |

Médias seguidas de letra minúscula entre linhas na vertical e letra maiúscula entre colunas na horizontal, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% (ou 0.05) de probabilidade. Rhizotrop 2<sup>®</sup> – *B. japonicum*; Rhizotrop2<sup>®</sup> + SolubPhos<sup>®</sup> – *B. japonicum* + *B. subtilis* + *B. megaterium*; Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Azotrop – *B. japonicum* + *A. Brasilense*; Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Auras<sup>®</sup> – *B. japonicum* + *B. aryabhattai*.

A massa seca da radícula (MSR), refletiu as estratégias morfológicas induzidas pelos bioestimulantes sob diferentes regimes hídricos ( $p < 0,05$ ) (Tabela 16). Sob déficit hídrico na lâmina de 0%, o tratamento Rhizotrop 2<sup>®</sup> + SolubPhos<sup>®</sup> sobressaiu-se isoladamente (0,02 g), enquanto os demais apresentaram inferiores (0,00 a 0,01 g). Esse incremento demonstra que o tratamento Rhizotrop 2<sup>®</sup> + SolubPhos<sup>®</sup> alterou o padrão de partição de fotoassimilados e a arquitetura celular radicular. Embora o comprimento tenha indicado que Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Auras, também alongou suas raízes sob seca, apenas o complexo Rhizotrop 2<sup>®</sup> + SolubPhos<sup>®</sup> proporcionou raízes com maior densidade e espessura cortical.

Sob irrigação plena (100%), todos os microrganismos superaram Rhizotrop 2<sup>®</sup> (0,03 x 0,02 g). Sob conforto hídrico, a planta eleva a taxa fotossintética e exuda mais compostos carbonados pelas raízes, alimentando a microbiota. Em resposta, as bactérias maximizam a Fixação Biológica do Nitrogênio (FBN) e a disponibilização de nutrientes, acelerando a divisão celular no dreno radicular (Krzyzanowski; Dias; França-Neto, 2022).

### 3.7 Interação Lâmina × Tratamento: Massa seca de cotilédones – MSC

A massa seca dos cotilédones (MSC), exibiu dependência significativa da interação lâmina x tratamento ( $p < 0,05$ ) (Tabela 17). Esta variável possui significado biológico profundo, pois quantifica o aporte real de reservas energéticas (proteínas, lipídeos e amido) que a planta-mãe sintetizou e translocou para os drenos reprodutivos

durante o enchimento de grãos.

**Tabela 17.** Massa seca de cotilédones (g plântula<sup>-1</sup>) plântulas de soja oriundas de sementes tratadas com bioestimulantes e diferentes lâminas de irrigação, Umuarama, PR.

| Lâmina de Irrigação % | Tratamento de sementes (Bioestimulantes) |                                                   |                                                 |                                               |
|-----------------------|------------------------------------------|---------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
|                       | Rhizotrop 2 <sup>®</sup>                 | Rhizotrop 2 <sup>®</sup> + SolubPhos <sup>®</sup> | Rhizotrop 2 <sup>®</sup> + Azotrop <sup>®</sup> | Rhizotrop 2 <sup>®</sup> + Auras <sup>®</sup> |
| 0                     | 0,13 bB                                  | 0,48 bA                                           | 0,23 bB                                         | 0,29 bB                                       |
| 50                    | 0,53 aA                                  | 0,43 bA                                           | 0,45 aA                                         | 0,56 aA                                       |
| 75                    | 0,62 aA                                  | 0,34 bB                                           | 0,65 aA                                         | 0,41 bB                                       |
| 100                   | 0,46 aA                                  | 0,60 aA                                           | 0,61 aA                                         | 0,52 aA                                       |
| 125                   | 0,47 aA                                  | 0,59 aA                                           | 0,60 aA                                         | 0,64 aA                                       |

Médias seguidas de letra minúscula entre linhas na vertical e letra maiúscula entre colunas na horizontal, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% (ou 0.05) de probabilidade. Rhizotrop 2<sup>®</sup> – *B. japonicum*; Rhizotrop2<sup>®</sup> + SolubPhos<sup>®</sup> – *B. japonicum* + *B. subtilis* + *B. megaterium*; Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Azotrop – *B. japonicum* + *A. Brasilense*; Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Auras<sup>®</sup> – *B. japonicum* + *B. aryabhattai*.

Sob déficit hídrico na (lâmina de 0%), o tratamento Rhizotrop 2<sup>®</sup> + SolubPhos<sup>®</sup> preservou a massa cotiledonar em 0,48 g, superando estatisticamente os demais tratamentos e representando maior acúmulo da biomassa em relação a Rhizotrop 2<sup>®</sup> (0,13 g). O déficit hídrico prejudica o crescimento vegetal de formas distintas, a depender de quão intensa e duradoura ela seja, bem como do estágio de maturação da planta. O fenômeno engatilha o fechamento dos estômatos, o aumento da concentração de açúcares nas folhas e a formação de espécies reativas de oxigênio. Se por um lado fechar os estômatos protege a planta contra a desidratação e mantém seu potencial hídrico foliar, por outro reduz a absorção de CO<sub>2</sub>, limitando o processo fotossintético (Julius *et al.*, 2017; Nasir e Toth, 2022; Santander *et al.*, 2024; Rafael, *et al.*, 2026).

De acordo com Swift, *et al.*, (2026), em que realizou o perfil transcricional de células vegetais, demonstrando que o déficit hídrico acelera o envelhecimento foliar em nível genético. Sob o déficit hídrico, folhas novas expressam precocemente genes associados à senescência. Segundo Azeem *et al.*, (2023), o tratamento bacteriano ativa defesas antioxidantes e acumula solutos compatíveis, mantendo a estabilidade das membranas celulares e estendendo o período de enchimento de grãos, garantindo fluxo contínuo de carbono para a formação dos tecidos de reserva dos cotilédones, o que se traduz em alto vigor embrionário (Marcos Filho, 2015; Peter *et al.*, 2024).

O tratamento Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Azotrop<sup>®</sup> expressou a máxima eficiência sob a lâmina de 75%, atingindo o maior acúmulo cotiledonar (0,65 g), sementes de soja possuem demanda por compostos nitrogenados na síntese de proteínas de reserva (Guo *et*

*al.*, 2022). Conforme Naoe *et al.*, (2021), *A. brasilense* ativa rotas enzimáticas de assimilação de nitrogênio; sob umidade moderada (75%), sua atividade é maximizada sem custos excessivos, promovendo fluxo massivo de aminoácidos estruturais direcionados à semente.

Nas lâminas de 100 e 125%, todos os tratamentos biológicos superaram a Rhizotrop 2<sup>®</sup> ( $p < 0,05$ ), com destaque para Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Auras<sup>®</sup> na lâmina de 125% (0,64 g). Solos saturados induzem hipóxia radicular, ativando rotas de fermentação alcoólica e produção de etileno que comprometem a formação das sementes. Conforme Mun *et al.*, (2024); Hao *et al.*, (2025), *B. aryabhattai* mitiga esse estresse por meio da ACC deaminase e da modulação fitormonal, permitindo que a planta-mãe mantenha a deposição de reservas densas nos cotilédones (Ferreira *et al.*, 2011; Zhao *et al.*, 2022; Zheng *et al.*, 2025).

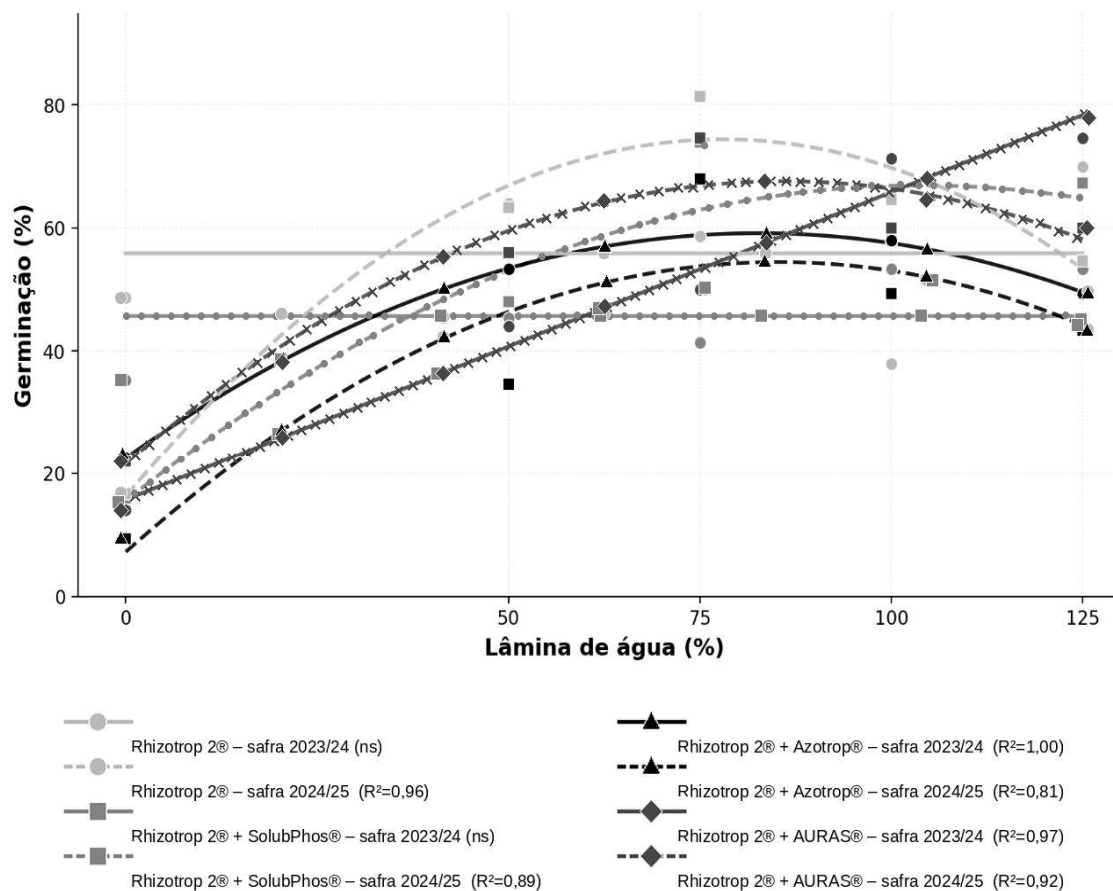
### 3.8 Interação tripla Safra x lâmina de irrigação x Bioestimulante – (A x B x C)

Conforme evidenciado na Tabela 10. A interação tripla entre safra × lâmina de irrigação × bioestimulante foi significativa ( $p < 0,05$ ) para cinco das seis variáveis avaliadas: germinação (G), comprimento da parte aérea (CPA), comprimento da radícula (CR), massa seca da parte aérea (MSPA) e massa seca da radícula (MSR), sendo não significativa apenas para a massa seca de cotilédones (MSC) ( $p \geq 0,05$ ). Esse resultado confirma que, para a maioria dos parâmetros fisiológicos, a resposta da soja aos bioestimulantes depende simultaneamente do ano agrícola e da disponibilidade hídrica. Isso reforça a necessidade de interpretar as interações duplas da Tabela 11 à luz do desdobramento da interação tripla apresentado a seguir.

A lâmina de irrigação por ser um fator quantitativo, essa interação foi desdobrada por meio de curvas de regressão, ajustadas para cada bioestimulante em cada safra (Figuras 8 a 12). Essa abordagem é estatisticamente mais informativa que a comparação de médias (fatores qualitativos), descreve a forma da resposta (linear, quadrática ou nula) permitindo determinar a lâmina de máximo rendimento hídrico nos casos de respostas curvilíneas. Por fim, a não realização do desdobramento triplo para a MSC é coerente com os resultados da ANOVA (Tabela 10), não constituindo uma lacuna analítica.

A porcentagem de germinação em resposta às diferentes lâminas de irrigação, safras agrícolas e tratamentos biológicos está apresentada na Figura 8

**Figura 8.** Germinação – G de sementes de soja em função da lâmina de irrigação para cada bioestimulante e ano agrícola interação (A x B x C).



ns = coeficientes de regressão não significativos a 5% pelo teste F, representados pela média do bioestimulantes no ano agrícola. Rhizotrop 2®; Rhizotrop 2® + SolubPhos®, Rhizotrop 2® + Azotrop®, Rhizotrop 2® + Auras®.

A germinação foi a variável que evidenciou o contraste mais nítido entre as safras dentre os cinco parâmetros avaliados. Na safra 2023/24, os tratamentos Rhizotrop 2® e Rhizotrop 2® + Solub Phos® não apresentaram resposta significativa em função das lâminas de irrigação ( $p \geq 0,05$ ), mantendo-se estáveis com médias de 55,87% e 45,73%, respectivamente. Essa ausência de resposta ao incremento hídrico é coerente com o cenário de alta pluviosidade e condições hídricas favoráveis da referida safra, ambiente no qual a disponibilidade de água não se comportou como fator limitante. Em contrapartida, na safra 2024/25, sob condições de restrição hídrica, todos os quatro tratamentos passaram a exibir comportamento quadrático significativo. Os modelos polinomiais apresentaram boa qualidade de ajuste ( $R^2$  entre 0,71 e 0,85), revelando pontos de máximo rendimento hídrico concentrados entre as lâminas de 78% (Rhizotrop 2®) e 104% (Rhizotrop 2® + SolubPhos®).

Essa transição no padrão de resposta migrando de um modelo linear nulo (estável)

para um modelo quadrático ajustado é estatisticamente e biologicamente relevante. Ela indica que o estresse hídrico severo ocorrido na segunda safra atuou como um fator revelador de contrastes, os quais permaneciam mascarados sob condições ambientais hídricas ótimas. Este comportamento é amplamente descrito na literatura sobre a interação tratamento  $\times$  ambiente em ensaios de campo com insumos biológicos. Desse modo, os resultados corroboram que o déficit hídrico na safrinha altera os padrões de resposta biológica por meio da expressão da plasticidade adaptativa da cultura (Napier *et al.*, 2023; Al-Malki *et al.*, 2026).

O deslocamento da máxima germinação para uma lâmina mais elevada em Rhizotrop 2<sup>®</sup> + SolubPhos<sup>®</sup> (104%), mesmo sob o estresse na segunda safra, é consistente com a maior tolerância desse consórcio à saturação hídrica. Essa robustez é biologicamente plausível para espécies do gênero *Bacillus*: formando esporos capazes de resistir a condições ambientais adversas, sustentando sua persistência e atividade rizosférica mesmo sob excesso hídrico. Essa característica é corroborada por Silva *et al.* (2024); Maciag e Dorota, (2025); Manguana, *et al.*, (2026), que destacam os benefícios do *biopriming* com *Bacillus* spp. otimizando o vigor, na velocidade de germinação e no desenvolvimento inicial de plântulas de soja em cenários restritivos.

Esse mesmo grupo de estudos reforça que bioestimulantes microbianos podem melhorar a estrutura do solo e o desenvolvimento radicular, favorecendo a absorção e retenção de água pela planta e com isso, ampliando sua capacidade de tolerância a condições hídricas oscilantes tanto por aumentar a capacidade das plantas em absorver e retardar a perda de água quanto por melhorar a estrutura do solo e o desenvolvimento radicular, o que permite absorção mais eficiente de água e maior capacidade de retenção hídrica, além de potencializar mecanismos antioxidantes e de ajuste osmótico (Marinkovic *et al.*, 2022; kim e Sang 2023).

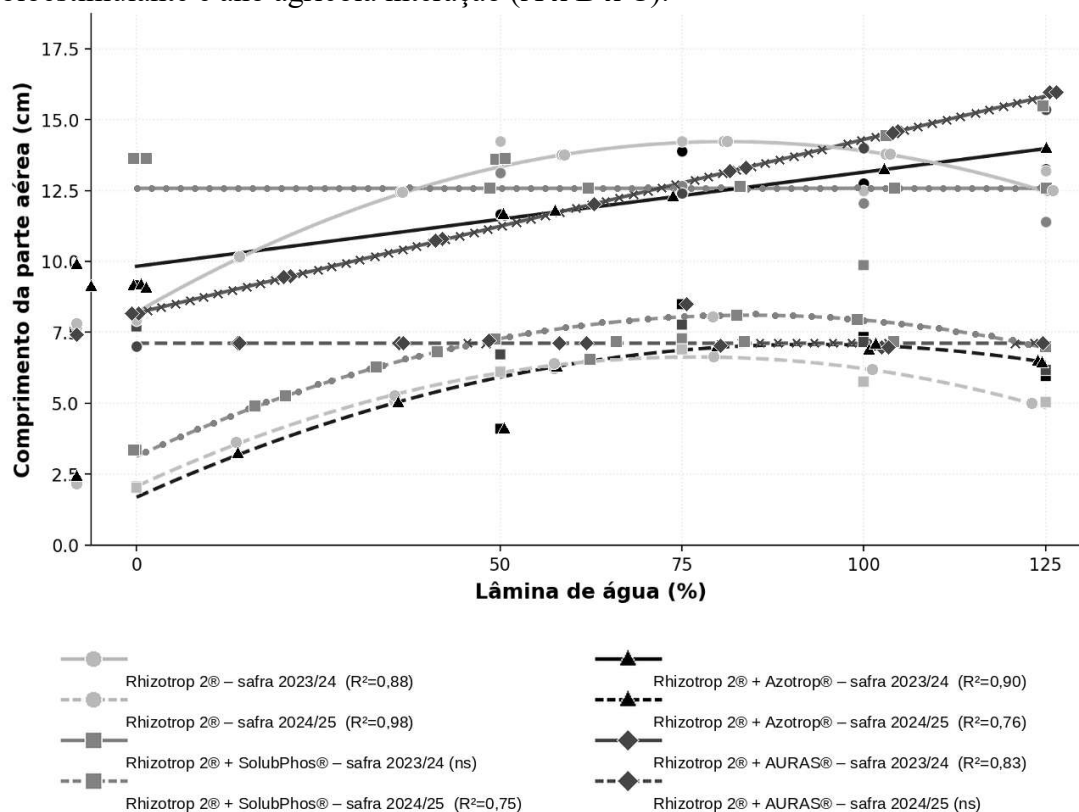
Chama atenção, ainda, o fato de que, apesar de ambos os tratamentos apresentarem R<sup>2</sup> elevado em 2024/25, o Rhizotrop 2<sup>®</sup> atinge seu pico de germinação com uma lâmina mais baixa (78%) do que Rhizotrop 2<sup>®</sup> + SolubPhos<sup>®</sup> (104%). Estatisticamente, isso significa que a curva de resposta da testemunha é mais estreita e mais sensível a desvios da lâmina ótima, ao passo que o consórcio bioestimulante desloca e amplia a janela de tolerância hídrica, achado alinhado a evidências de que consórcios com cepas de *Bacillus* conferem tolerância ao estresse osmótico durante a germinação de sementes de soja, atuando sobre marcadores de estresse oxidativo e vias hormonais associadas à germinação avaliando extratos bioativos de duas linhagens bioestimulantes,

*B. butanolivorans* KJ40 e *B. siamensis* H30-3, quanto à capacidade de conferir tolerância ao estresse osmótico em sementes de soja durante a germinação, com efeitos observados sobre peroxidação lipídica, enzimas antioxidantes e vias de sinalização hormonal ligadas à germinação (kim e Sang 2023; Shahzad *et al.*, 2025).

Em síntese, os melhores resultados de germinação foram obtidos com Rhizotrop 2<sup>®</sup> + AURAS<sup>®</sup> na safra 2023/24, com resposta linear crescente sem o ponto de máxima eficiência definido até 125% de lâmina e valor estimado de aproximadamente 78%. O tratamento com resposta quadrática mais consistente foi Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Azotrop<sup>®</sup> (2023/24), com ponto de máxima eficiência definido em 82,6% de lâmina ( $R^2 = 1,00$ ), indicando uso mais eficiente da água para maximizar a germinação. A testemunha Rhizotrop 2<sup>®</sup> isolado só apresentou efeito significativo da lâmina na safra 2024/25, sugerindo resposta dependente das condições do ano agrícola

O desenvolvimento do dossel vegetativo, mensurado por meio do comprimento da parte aérea (CPA) em função das diferentes lâminas de irrigação, safras agrícolas e tratamentos bacterianos, encontra-se ilustrado na Figura 9.

**Figura 9.** Comprimento da parte aérea – CPA, em função da lâmina de água, para cada bioestimulante e ano agrícola interação (A x B x C).



ns = coeficientes de regressão não significativos a 5% pelo teste F, representados pela média do bioestimulante no ano agrícola. Rhizotrop 2<sup>®</sup>; Rhizotrop 2<sup>®</sup> + SolubPhos<sup>®</sup>; Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Azotrop<sup>®</sup>; Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Auras<sup>®</sup>.

Para o (CPA), o padrão observado na safra 2023/24 contrapôs-se ao verificado para a germinação. Os tratamentos Rhizotrop 2<sup>®</sup>, Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Azotrop<sup>®</sup>, Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Auras<sup>®</sup> exibiram respostas significativas em função das lâminas de irrigação. Em contraste, o consórcio Rhizotrop 2<sup>®</sup> + SolubPhos<sup>®</sup> não apresentou ajuste estatisticamente significativo ( $p \geq 0,05$ ); média de 12,58 cm), sugerindo que a coinoculação com essas cepas atenuou a influência das oscilações ambientais sobre o crescimento inicial da soja.

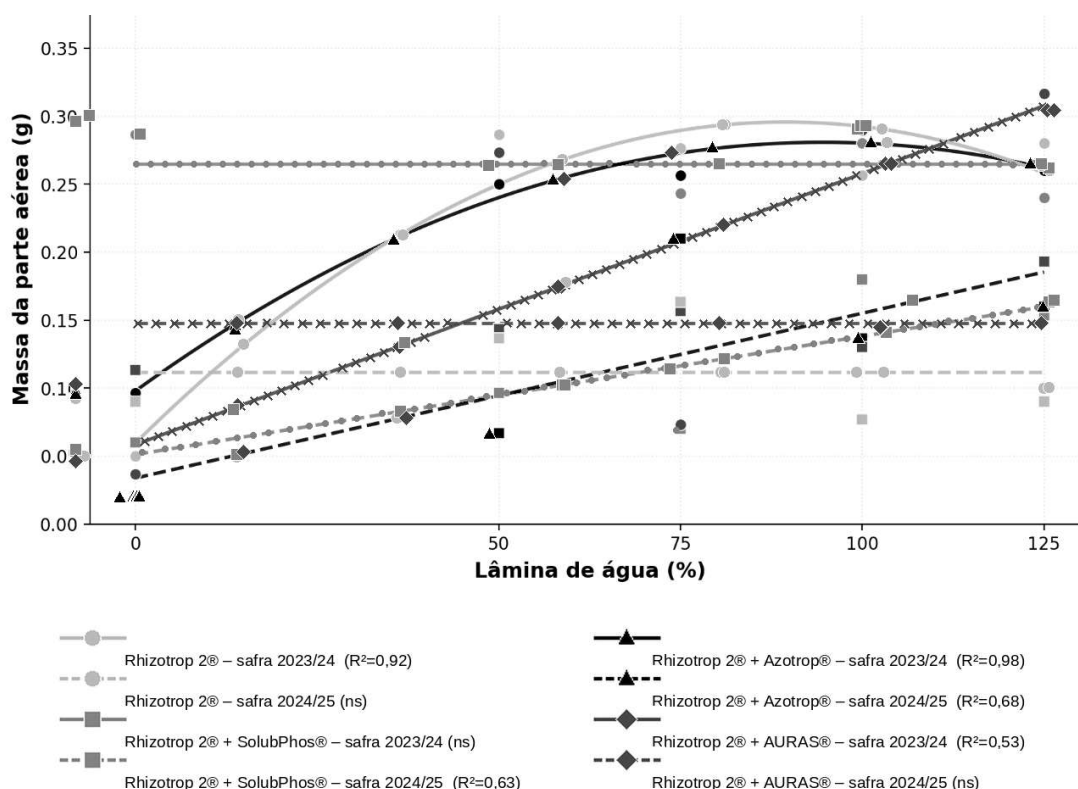
Na safra 2024/25, constatou-se uma alteração na dinâmica de resposta, o tratamento Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Azotrop<sup>®</sup> apresentou comportamento não significativo ( $p \geq 0,05$ ); média de 7,11 cm), enquanto o Rhizotrop 2<sup>®</sup> + SolubPhos<sup>®</sup> passou a responder de forma quadrática às variações hídricas (Ashwin et al., 2023; Cruz et al., 2025).

O alongamento inicial da parte aérea da soja respondeu de forma distinta aos tratamentos biológicos e às lâminas de água aplicadas. Na safra 2023/24, a testemunha (Rhizotrop 2<sup>®</sup>) exibiu resposta quadrática significativa, com o ponto de máxima eficiência estimado na lâmina de água de 81% (CPA projetado em 14 cm). Já na safra 2024/25, o comportamento quadrático transladou para a coinoculação com Rhizotrop 2<sup>®</sup> + SolubPhos<sup>®</sup>, cujo ponto ideal hídrico situou-se na lâmina de 77%, com crescimento máximo estimado em 8 cm. Essa forte proximidade entre os pontos de máximo calculados (77% e 81%) indica que o desenvolvimento inicial do CPA converge para uma lâmina ideal estável entre 75% e 80%, independentemente do arranjo microbiológico. Adicionalmente, a magnitude das curvas corrobora a variação de vigor intersafra, visto que os picos de crescimento em 2024/25 não atingiram a metade dos observados em 2023/24 (Marinkovic et al., 2022).

Em Síntese, o comprimento da parte aérea na safra 2023/24, superou consistentemente a 2024/25 em todos os tratamentos (valores duas vezes maiores). Rhizotrop 2<sup>®</sup> + AURAS<sup>®</sup> (2023/24) apresentou o maior comprimento estimado ( $\approx 15,8$  cm, resposta linear crescente até 125% de lâmina). A testemunha (2023/24) obteve ponto de eficiência bem ajustado em 81% de lâmina ( $\approx 14,2$  cm,  $R^2 = 1,00$ ), próximo ao desempenho de Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Azotrop<sup>®</sup> (ótimo em 104%,  $\approx 13,3$  cm).

Os resultados referentes ao acúmulo de biomassa seca da parte aérea sob diferentes lâminas de irrigação e bioestimulantes estão dispostos na Figura 10.

**Figura 10.** Massa seca da parte aérea – MSPA, em função da lâmina de irrigação, para cada bioestimulante e ano agrícola interação (A x B x C).



ns = coeficientes de regressão não significativos a 5% pelo teste F, representados pela média do bioestimulante no ano agrícola Rhizotrop 2®, Rhizotrop 2® + SolubPhos®, Rhizotrop 2® + Azotrop®, Rhizotrop 2® + Auras®.

Os dados de massa seca da parte aérea (MSPA) corroboram a capacidade dos bioestimulantes em atenuar variações ambientais, conforme previamente observado. Na safra 2023/24, o tratamento apenas com Rhizotrop 2® não apresentou variação estatisticamente significativa (ns) face às lâminas testadas, mantendo o platô médio mais elevado e estável do ensaio (próximo a 0,26 g). O tratamento Rhizotrop 2® + Azotrop® apresentou comportamento quadrático na safra 2023/24, atingindo seu ponto de máxima eficiência próximo a 95% de lâmina hídrica, e comportamento linear crescente na safra 2024/25. Esse padrão sugere que o acúmulo de biomassa mediado por essa coinoculação é favorecido pelo incremento da disponibilidade hídrica para manifestar seu potencial máximo (Da-Silva et al., 2024).

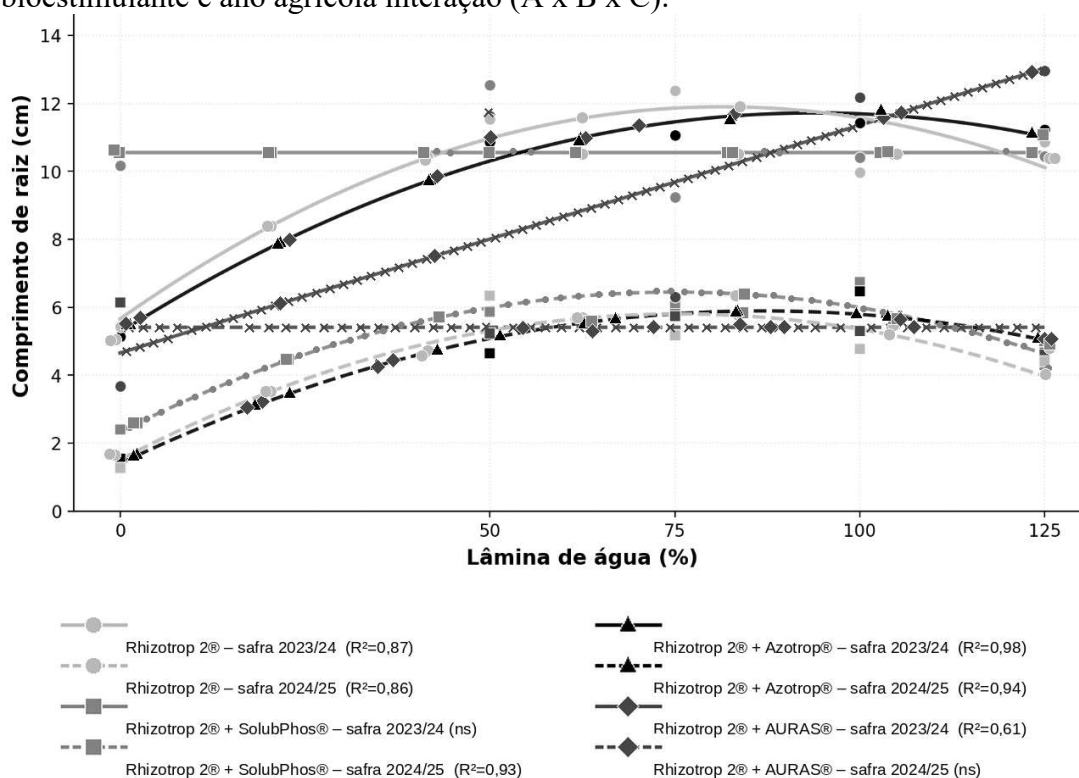
Por outro lado, o tratamento Rhizotrop 2® + SolubPhos® apresentou ajuste quadrático robusto na safra 2023/24, enquanto na safra 2024/25 exibiu comportamento linear crescente. Já os tratamentos Rhizotrop 2® (safra 2024/25) e Rhizotrop 2® + AURAS® (safra 2024/25) não responderam significativamente ao regime hídrico (ns), mantendo-se estáveis em patamares inferiores (médias próximas a 0,11 g e 0,14 g,

respectivamente). Essa ausência de resposta indica que, sob as condições da safra 2024/25, o acúmulo de biomassa aérea nesses tratamentos específicos deixou de ser regulado pela lâmina de irrigação, possivelmente devido a uma limitação fisiológica basal que o manejo hídrico isolado não foi capaz de mitigar.

Em síntese o padrão se repete, Rhizotrop 2® + AURAS® (2023/24) apresentou a maior massa seca da parte aérea estimada ( $\approx 0,31$  g, ainda crescente aos 125% de lâmina), seguido pela testemunha ( $\approx 0,30$  g, sendo o ponto ótimo em 89% de lâmina) e por Rhizotrop 2® + Azotrop® ( $\approx 0,28$  g, ótimo em 95%). A safra 2024/25 apresentou valores consistentemente inferiores (máximo estimado de 0,16 e 0,19 g), reforçando o efeito do ano agrícola sobre o acúmulo de biomassa aérea

O sistema radicular avaliado por meio do teste de comprimento de raiz (C.R) em resposta às diferentes lâminas de irrigação, safras e tratamentos com bioestimulantes, está representado na Figura 11.

**Figura 11.** Comprimento da radícula – CR, em função da lâmina de irrigação para cada bioestimulante e ano agrícola interação (A x B x C).



ns = coeficientes de regressão não significativos a 5% pelo teste F, representados pela média do bioestimulante no ano agrícola. Rhizotrop 2®; Rhizotrop 2® + SolubPhos®; Rhizotrop 2® + Azotrop®; Rhizotrop 2® + Auras®.

O comprimento radicular CR consolida um padrão de três variáveis consecutivas (G, MSPA e CR) em que o tratamento Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Azotrop<sup>®</sup> se destaca pela consistência de resposta ao regime hídrico, mantendo-se dependente da lâmina em ambas as safras, enquanto o Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Auras<sup>®</sup> repete o padrão de eficácia restrita à safra favorável (2023/24). Esse contraste apresenta respaldo na literatura recente sobre *B. aryabhatai*, tanto para o mecanismo geral de promoção de crescimento quanto, especificamente, para sua resposta sob restrição hídrica. A recorrência de Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Azotrop<sup>®</sup> como um tratamento com ajuste linear crescente e significativo em ambas as safras, (linhas pretas com triângulos contínua e tracejada) reforça a interpretação de que o crescimento radicular, promovido por *A. Brasilense* responde diretamente ao incremento da disponibilidade hídrica para expressar seu potencial máximo, um padrão consistente com o que já foi discutido para as demais variáveis vegetativas e que dialoga com a literatura sobre condicionamento hídrico da colonização radicular por esse gênero (Fukami; Cerezini; Hungria, 2018).

Por outro lado, o fato de Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Auras<sup>®</sup> ter apresentado um comportamento quadrático robusto na safra 2023/24 (linha preta contínua com losangos, com ponto de máxima próximo a 90-100% de lâmina), mas ter sido não significativo (ns) na safra 2024/25 para CR (linha tracejada preta com losangos, mantendo um platô estável e baixo próximo a 5,5 cm), é coerente com achados recentes especificamente sobre esse organismo em soja sob diferentes regimes hídricos (Capellesso et al., 2026; Cerezini et al., 2016). Esses autores, avaliando *B. aryabhatai* e *P. fluorescens* em soja sob condições bem irrigadas e de déficit hídrico, verificaram que, em condições bem irrigadas, a co-inoculação promoveu a maior biomassa fresca de raiz e incrementou consistentemente a biomassa da parte aérea em relação ao controle.

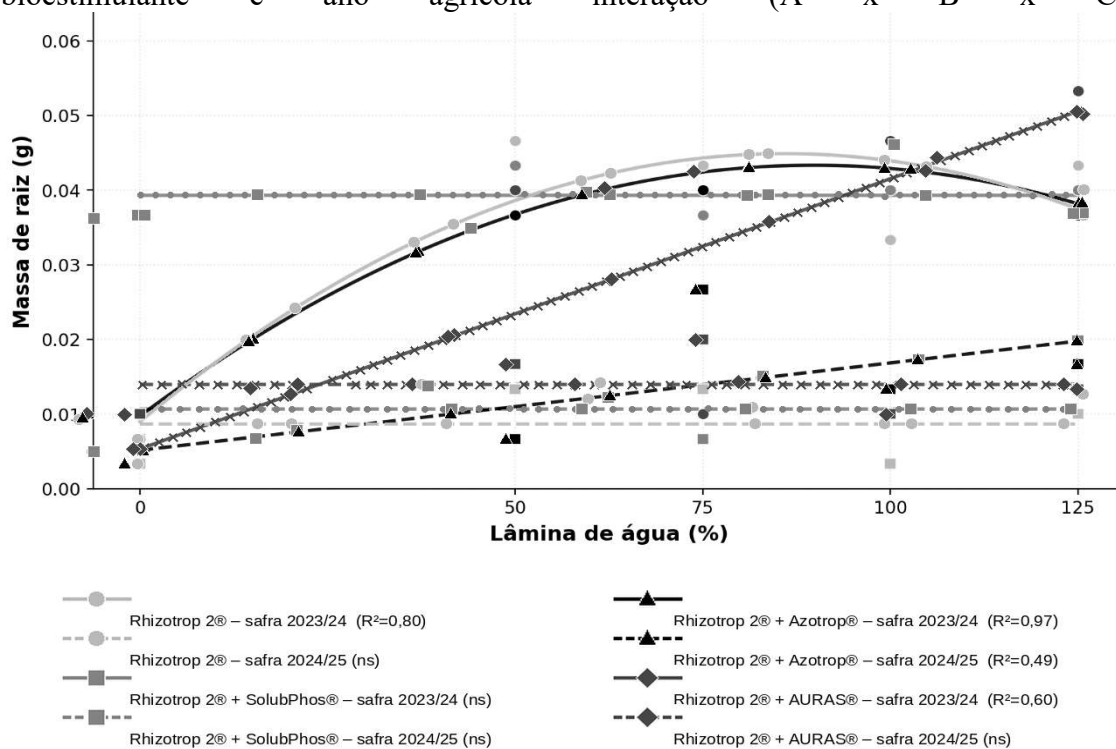
Esse resultado explica por que, no presente experimento, Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Auras<sup>®</sup> perdeu significância para o crescimento radicular na safra (2024/25), sugerindo que o efeito protetor do bioestimulante sobre a viabilidade inicial e seu efeito sobre o alongamento radicular, operam por vias distintas com sensibilidades diferentes ao déficit hídrico acumulado. Esse mecanismo de ação diferenciado é corroborado por um estudo publicado por Mun *et al.*, (2024), demonstrando que a cepa SRB02 de *B. aryabhatai* promove o desenvolvimento radicular de soja via manutenção nutricional e clorofila, colonizando raízes das plantas sob condições fisiológicas adequadas. Por depender de manutenção fotossintética e nutricional contínua da planta hospedeira, esse comportamento é compatível com a hipótese de que o efeito de Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Auras<sup>®</sup>

sobre o alongamento radicular exige uma base fisiológica mínima da planta, que a safra 2024/25, mais desfavorável, não ofereceu.

Em síntese, Rhizotrop 2® + AURAS® (2023/24) liderou o comprimento de raiz ( $\approx 13,0$  cm, resposta linear), seguido da testemunha ( $\approx 11,9$  cm, ótimo em 81% de lâmina) e de Rhizotrop 2® + Azotrop® ( $\approx 11,7$  cm, ponto de eficiência em 94%). Assim como nas demais variáveis de crescimento, a safra 2024/25 apresentou desempenho bastante inferior (valores máximos entre 4,3 e 6,4 cm), com Rhizotrop 2® + SolubPhos® não significativo em nenhuma das duas safras.

As variações no acúmulo de biomassa do sistema radicular, expressas por meio da massa de raiz (MSR) sob diferentes lâminas de irrigação, tratamentos biológicos e safras agrícolas, estão detalhadas na Figura 12.

**Figura 12.** Massa seca da radícula – MSR em função da lâmina de irrigação, para cada bioestimulante e ano agrícola interação (A x B x C).



ns = coeficientes de regressão não significativos a 5% pelo teste F, representados pela média do bioestimulante no ano agrícola; Rhizotrop 2® + SolubPhos®, Rhizotrop 2® + Azotrop®, Rhizotrop 2® + Auras® e Rhizotrop 2®.

A massa seca de raiz (MSR), expressa o caso mais evidente de estabilidade homeostática induzida por microrganismos. O tratamento Rhizotrop 2® + SolubPhos® não apresentou resposta significativa (ns) às lâminas de irrigação em ambas as safras, mantendo-se em patamares estáveis (um platô elevado próximo a 0,039 g em 2023/24 e

uma linha horizontal inferior próxima a 0,010 g em 2024/25). Este consórcio bacteriano permaneceu indiferente à variação hídrica nas duas safras, consolidando sua capacidade de amortecer o estresse abiótico e modular o crescimento radicular por vias endógenas independentes da umidade externa, conforme preconizado por (Lee *et al.*, 2024; Buqori *et al.*, 2025; Da-Silva *et al.*, 2026).

Em contrapartida, o tratamento Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Azotrop<sup>®</sup> mostrou-se estritamente dependente da água, sendo o único tratamento de coinoculação com modelos significativos em ambas as safras. Na safra favorável (2023/24), exibiu comportamento quadrático robusto com ponto de máximo próximo a 89% da lâmina de irrigação, seguido por um leve declínio até 125%. Esse comportamento sinaliza uma sensibilidade parcial à hipóxia radicular sob excesso hídrico, similar ao declínio também observado no tratamento isolado com Rhizotrop 2<sup>®</sup> (safra 2023/24), que apresentou inflexão após 90% da lâmina. Já na safra desfavorável (2024/25), o Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Azotrop<sup>®</sup> manteve um ajuste linear crescente e significativo, indicando que mesmo em condições restritivas o acúmulo de biomassa radicular continuou responsivo ao incremento da umidade. Essa total dependência em relação à água corrobora a literatura clássica quanto à natureza Gram-negativa e não esporulante de *Azospirillum*, cuja eficiência agrônômica é condicionada pela umidade do solo, sem janelas de neutralidade hídrica, limitando sua performance sob cenários de estresse por encharcamento (Fukami; Cerezini; Hungria, 2018; Salazar *et al.*, 2022; Zhou *et al.*, 2023).

Enquanto o Rhizotrop 2<sup>®</sup> + SolubPhos<sup>®</sup> confirmou seu caráter homeostático ao manter-se neutro e estável, o tratamento Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Auras<sup>®</sup> (*B. aryabhatai*) exibiu comportamento dependente do ambiente. Na safra favorável de 2023/24, o Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Auras<sup>®</sup> apresentou um ajuste linear crescente altamente responsivo e acentuado (linha contínua preta com losangos com marcação 'x'), atingindo o maior acúmulo absoluto de biomassa radicular na lâmina de 125% (superior a 0,05 g). No entanto, na safra (2024/25), o tratamento perdeu completamente a significância hídrica (ns), mantendo-se estagnado em um platô baixo próximo a 0,014 g. Esse contraste indica que o potencial de *B. aryabhatai* no incremento de biomassa vegetal aérea e radicular requer um ambiente inicial com alta disponibilidade de recursos expressando máxima performance biológica, diferindo de sua conhecida ação estritamente protetiva durante a fase de emergência, conforme validado por (Mun *et al.*, 2024; Siddika *et al.*, 2024; Zonta *et al.*, 2026).

Em síntese, o ranking se mantém Rhizotrop 2<sup>®</sup> + AURAS<sup>®</sup> (2023/24) com a maior MSR estimada ( $\approx 0,051$  g), seguido da testemunha ( $\approx 0,045$  g, ponto de máxima eficiência

em 86% de lâmina) e de Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Azotrop<sup>®</sup> ( $\approx 0,043$  g, ótimo em 90%). Rhizotrop 2<sup>®</sup> + SolubPhos<sup>®</sup> não foi significativo em ambas as safras para esta variável, e a safra 2024/25 voltou a apresentar valores substancialmente menores que 2023/24.

Síntese geral considerando as cinco variáveis com interação tripla significativa, observa-se um padrão consistente

(2) Rhizotrop 2<sup>®</sup> + SolubPhos<sup>®</sup> foi o tratamento com maior número de respostas não significativas à lâmina de irrigação, sugerindo menor sensibilidade ao regime hídrico entre os bioestimulantes avaliados.

(3) Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Azotrop<sup>®</sup> foi o tratamento com resposta quadrática mais consistente e melhor ajustada ( $R^2$  geralmente acima de 0,80), com pontos de máxima eficiência hídrica concentrados entre 82% e 113% de lâmina, representando a combinação mais eficiente em termos de uso da água, pois atinge respostas próximas do máximo biológico sem necessidade de irrigação excedente.

(3) A safra 2023/24 superou consistentemente a 2024/25 em praticamente todas as variáveis de crescimento (CPA, MSPA, CR, MSR), com valores estimados de 2 a 3 vezes maiores, indicando forte efeito do ano agrícola (possivelmente associado a condições climáticas ou de manejo distintas entre as safras) sobre a resposta da soja aos bioestimulantes e à lâmina de irrigação.

(4) Rhizotrop 2<sup>®</sup> + AURAS<sup>®</sup> apresentou os maiores valores absolutos estimados na safra 2023/24 em todas as variáveis, porém com resposta linear crescente até a maior lâmina testada (125%), sem indicar um ponto de saturação o que sugere que seu potencial máximo pode não ter sido alcançado dentro da faixa experimental, sendo recomendável testar lâminas superiores a 125% em estudos futuros.

#### 4 CONCLUSÃO

A interação tripla safra  $\times$  lâmina de irrigação  $\times$  bioestimulante foi significativa ( $p < 0,05$ ) para germinação – G, comprimento da parte aérea – CPA, comprimento da radícula – CR, massa seca da parte aérea – MSPA e massa seca da radícula – MSR, confirmando que a resposta da soja aos bioestimulantes depende conjuntamente do ano agrícola e da disponibilidade hídrica; apenas a massa seca de cotilédones – MSC não foi afetada por essa interação.

Entre os tratamentos avaliados, Rhizotrop 2<sup>®</sup> (testemunha) foi o único tratamento com ajuste quadrático significativo em ambas as safras para o CPA, com ponto de máxima eficiência hídrica estável entre 75 – 80% mesmo sem coinoculação; contudo, foi o mais penalizado sob déficit hídrico lâmina de (0%), com os menores valores absolutos de CPA, CR e MSPA, e o que exibiu maior sensibilidade ao excesso hídrico (declínio após ~92% da lâmina), evidenciando ausência do efeito protetor característico dos consórcios bioestimulados nos extremos hídricos. Rhizotrop 2<sup>®</sup> + SolubPhos<sup>®</sup> apresentou o maior número de respostas não significativas, evidenciando menor sensibilidade à lâmina de irrigação. Rhizotrop 2<sup>®</sup> + Azotrop<sup>®</sup> destacou-se como o mais eficiente do ponto de vista hídrico, com respostas quadráticas bem ajustadas ( $R^2 > 0,80$ ) e ponto de máxima resposta entre 82% e 113% da lâmina, atingindo desempenho próximo do máximo sem necessidade de irrigação excedente. Rhizotrop 2<sup>®</sup> + AURAS<sup>®</sup> produziu os maiores valores absolutos na safra 2023/24, porém em resposta linear ainda crescente aos 125% de lâmina, sem indicar saturação sugerindo potencial não totalmente explorado dentro da faixa testada.

Por fim, a safra 2023/24 superou consistentemente a 2024/25 em todas as variáveis de crescimento, indicando forte influência das condições do ano agrícola sobre a eficácia dos bioestimulantes.

## 5 REFERÊNCIAS

- AL-TAMMAR, F. K.; KHALIFA, A. Y. Z. Bactérias promotoras de crescimento de plantas (BPCP) impulsionam a segurança alimentar. **Revista Brasileira de Biologia**, v. 82, p. e267257, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/1519-6984.267257>
- AL-MALKI, M. A.; BADRAN, A. E.; AL-GHAMDI, A. A.; EL-ZOHRI, M.; FAYAD, S. S.; HASSAN, A. R.; HASSAN, A. M. Genotype-and Environment-Dependent Effects of Biostimulant Protocols on Flowering, Maturity, and Stability in White Lupin (*Lupinus albus* L.). **Agronomy**, v. 16, n. 14, p. 1389, 2026. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy16141389>
- ASHWIN, R.; BAGYARAJ, D. J.; MOHAN RAJU, B. Ameliorating the drought stress tolerance of a susceptible soybean cultivar, MAUS 2 through dual inoculation with selected rhizobia and AM fungus. **Fungal Biology and Biotechnology**, v. 10, n. 1, p. 10, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40694-023-00157-y>
- AZEEM, M.; JAVED, S.; ZAHOOR, A. F. Bacillus species as potential plant growth promoting rhizobacteria for drought stress resilience. **Russian Journal of Plant Physiology**, v. 70, n. 4, p. 59, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1134/s1021443723600538>
- BARBOSA, J. C e MALDONADO JÚNIOR, W. Experimentação Agronômica & AgroEstat: Sistema para Análises Estatísticas de Ensaios Agronômicos. Jaboticabal, SP: FUNEP. p. 396, 2015
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Regras para análise de sementes. Brasília, DF: MAPA/Secretaria de Defesa Agropecuária, 2025. [https://wikisda.agricultura.gov.br/ptbr/Laborat%C3%B3rios/Metodologia/Sementes/RA\\_S\\_2025/cap\\_4\\_Germinacao\\_rev\\_1](https://wikisda.agricultura.gov.br/ptbr/Laborat%C3%B3rios/Metodologia/Sementes/RA_S_2025/cap_4_Germinacao_rev_1). Acesso em: 15 ago. 2026
- BUQORI, D. M. A.; SUGIHARTO, B.; SUHERMAN, S. T. A.; HARIYONO, K. Mitigando o estresse hídrico pela aplicação de Bacillus spp. tolerantes à seca, a arquitetura radicular, o crescimento, a expressão de genes antioxidantes e fotossintéticos na cana-de-açúcar foram aprimorados. **Scientific Reports**, v. 15, n. 1, p. 5259, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-89457-4>
- CALDERON, R. B.; GOULI, S.; BARPHAGHA, I.; HAM, J. H. Growth promotion and stress tolerance of soybean plants driven by seed treatment with synthetic bacterial community of soybean-associated beneficial bacteria. **Frontiers in Plant Science**, v. 16, p. 1729743, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1729743>
- CAPPELLESSO, T. G.; MAZARO, S. M.; RUSSIANO, M. C S.; KNISS, Y. K.; SALVADORI, C. N.; DOS-SANTOS P L. R.; HOFFMANN, R. Potential of Bacillus aryabhattai and Pseudomonas fluorescens for Promoting Plant Growth under Water Stress **REMUNOM**, v. 13, n. 16, p. 1-18. 2026. DOI: <https://doi.org/10.66104/js655245>
- CEREZINI, P.; KUWANO, B. H.; DOS SANTOS, M. B.; TERASSI, F.; HUNGRIA, M.; NOGUEIRA, M. A. Strategies to promote early nodulation in soybean under drought. **Field Crops Research**, v. 196, p. 160-167, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.06.017>

COLET, F.; MOURTZINIS, S.; VANN, R. A.; NAEVE, S.; CONLEY, S. P.; MATCHAM, E. G.; LINDSEY, L. E. Commercial biostimulant seed treatments showed minimal impact on soybean seed yield across the United States. **Field Crops Research**, 334, 110170, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2025.110170>

COSTA, V. C.; HANDTE, V. G.; PORTELA, V. O.; DE PEREIRA, E. P. Uso de bactérias promotoras de crescimento na mitigação do estresse hídrico na soja. **Observatório de La Economía Latinoamericana**, v. 24, n. 1, p. e12895-e12895, 2026. DOI: <https://doi.org/10.55905/oelv24n1-075>

CRUZ, RDC, NASCENTE, AS, FERREIRA, IVL, DA COSTA MONTEIRO, NO, SILVA, MA, DUARTE, GA.; NETO, JB. Rizobactérias multifuncionais no crescimento inicial da raiz de mudas de soja, feijão comum, milho e arroz de terras altas. **Semina Ciências Agrárias**, v. 46, n.2, p. 383-400, 2025. DOI: <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2025v46n2p383>

DA-SILVA, J. P. A.; CRUSIOL, L. G. T.; FOLONI, J. S. S.; FARIAS, J. R. B.; CHICATI, M. L.; DE-OLIVEIRA, R. B.; FALCIONI, R. O regime hídrico determina as respostas de crescimento e alocação de biomassa dependentes da dose de plântulas de soja a *Bacillus subtilis* e *Bacillus amyloliquefaciens*. **Plants**, v. 15, n. 15, p. 2267, 2026. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants15152267>

DA-SILVA, Dobyas Maclen Marques et al. Biopriming de sementes com *Parachlorella*, *Bacillus subtilis* e *Trichoderma harzianum* atenua os efeitos da salinidade na soja. **BMC Plant Biology**, v.24, p. 1149,2024. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12870-024-05646-9>

DA-SILVA, D. M. M.; SANTOS, C. C.; WAGNER, F. E.; MARTINS, L. O. M.; OZÓRIO, J. P. A.; DA SILVA, O. A.; SCALON, S. D. P. Q. Seed biopriming with *Parachlorella*, *Bacillus subtilis*, and *Trichoderma harzianum* alleviates the effects of salinity in soybean. **BMC Plant Biology**, v. 24, n. 1, p.1149, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12870-024-05646-9>

DE-BORJA REIS, A. F.; ROSSO, L. H. M.; ADEE, E.; DAVIDSON, D.; KOVÁCS, P.; PURCELL, L. C.; CIAMPITTI, I. A. Seed inoculation with *Azospirillum brasilense* in the US soybean systems. **Field Crops Research**, v. 283, p. 108537, 2022. Doi: 10.1016/j.fcr.2022.108537

DE-SANTANA, D. M.; SARAIVA, L.; DE-SOUSA, D. B. e DINIZ, F. O. Potencial Fisiológico de Sementes de Soja em Função do Tamanho. **International Journal of Agrarian Sciences-PDVAGRO**, v. 3, n. 1, p. 158-169, 2024. DOI: <https://doi.org/10.31692/2764-3425.v3i1.43>

FERREIRA, D. F.. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e agrotecnologia**, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-70542011000600001>

FRANÇA-NETO, J. DE B. e KRZYZANOWSKI, F. C. Metodologia do teste de tetrazólio em semente de soja. **EMBRAPA londrina SOJA Documento 449**, p. 111, 2022.

FRANCESCHINI, S. B.; PAZ, I. C. P. E GUIMARÃES, A. M. Eficácia Agronômica de

Priestia arybathaii e Priestia megaterium Sobre a Produtividade da Soja (*Glycine max*). **Revista Inova Ciência & Tecnologia**, Uberaba, v. 10, 2024.

FUKAMI, J; CEREZINI, P; HUNGRIA, M. Azospirillum: benefits that go far beyond biological nitrogen fixation. **Amb Express**, v. 8, n. 1, p. 73, 2018.

GALBIERI, R.; DE OLIVEIRA, J. A.; NEGRI, B. F.; BOLDT, A. S.; DOS SANTOS RIZZI, U.; BELOT, J. L. Bacillus subtilis as growth-promoting rhizobacteria co-inoculated on Bradyrhizobium-treated soybean seeds in the planting furrow. **Revista Ceres**, v. 70, n. 6, p. e70601-e70601, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1590/0034-737X202370060001>

GHASSEMI-GOLEZANI, K; LOTFI, R. Influence of water stress and p position on oil and protein accumulation in soybean grains. v. 4, n. 9, p. 2341-2345, 2013.

GRAHL, T. D.; ROCKENBACH, A. P.; CASASSOLA, A. Outcomes of water deficit stress on the physiological quality of soybean seeds. **Journal of Seed Science**, v. 44, p. e202244030, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/2317-1545v44260716>

GUO, B.; SUN, L.; JIANG, S.; REN, H.; SUN, R.; WEI, Z.; QIU, L. J. Soybean genetic resources contributing to sustainable protein production. **Theoretical and Applied Genetics**, v. 135, n. 11, p. 4095-4121, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00122-022-04222-9>

HAO, Z.; ZHANG, S.; SHAO, Y.; PAN, Z.; MENG, T.; LIU, T.; YAN, L. Preparation and inoculation of Bacillus spp. and Sinorhizobium meliloti strains immobilized on biochar-humic acid improve potted soybean traits and soil parameters. **Environmental Technology & Innovation**, v. 38, p. 104210, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2025.104210>

INTERNATIONAL SEED TESTING ASSOCIATION (ISTA). International Rules for Seed Testing 2021: seed health testing methods. Bassersdorf: **ISTA**, 2021. Disponível em: [https://seedhealth.org/files/2021/02/ISTA\\_SHMethods\\_2021\\_7-004-ver-2.1.pdf](https://seedhealth.org/files/2021/02/ISTA_SHMethods_2021_7-004-ver-2.1.pdf). Acesso em: 26 jul. 2026

ISLAM, S. Agriculture, food security, and sustainability: a review. **Exploration of Foods and Foodomics**, v. 3, p. 101082, 2025. DOI: <https://doi.org/10.37349/eff.2025.101082>

JULIUS, B. T.; LEACH, K. A.; TRAN, T. M.; MERTZ, R. A.; BRAUN, D. M. Sugar transporters in plants: new insights and discoveries. **Plant and Cell Physiology**, v. 58, n. 9, p. 1442-1460, 2017. Doi: <https://doi.org/10.1093/pcp/pcx090>

KIM, S. T.; SANG, M. K. Enhancement of osmotic stress tolerance in soybean seed germination by bacterial bioactive extracts. **Plos one**, v. 18, n. 10, p. e0292855, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0292855>

KRZYŻANOWSKI, F. C.; DIAS, D. C. F. S.; FRANÇA-NETO, J. D. B. Deterioração e vigor da semente. Londrina: **Embrapa Soja**, 2022.

KRZYŻANOWSKI, F. C.; FRANÇA-NETO, J. B.; E HENNING, F. A. Importance of

the lignin content in the pod wall and seed coat on soybean seed physiological and health performances. **Journal of Seed Science**, v. 45, p. e202345006, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1590/2317-1545v45268562>

LI, S.; ZHANG, Z.; XU, J.; HAN, J.; ZHUANG, H.; CUI, X.; TAO, F. Global food security under a sustainability perspective: Assessment, challenges, and strategies. **Geography and Sustainability**, p. 100495, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2026.100495>

LEE, S.; KIM, J. A.; SONG, J.; CHOE, S.; JANG, G.; KIM, Y. A rizobactéria promotora do crescimento vegetal *Bacillus megaterium* modula a expressão de genes relacionados a antioxidantes e responsivos à seca para proteger o arroz (*Oryza sativa* L.) da seca. **Frontiers in microbiology**, v.15, p. 1430546, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1430546>

MARCHÃO, R. L.; SILVA, G. C. D.; ANDRADE, S. R. M. D.; J NIOR, F. B. D. R.; JÚNIOR, M. P. D. B.; HAPHONSSO, R. H.; CARVALHO, A. M. D. Improving soybean development and grain yield by complementary inoculation with growth-promoting bacteria *Azospirillum*, *Pseudomonas*, *Priestia*, and *Bacillus*. **Plants**, v. 14, n.3, p. 402, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants14030402>

MACIAG, T.; DOROTA M. K. Microbial enhancement of plant tolerance to waterlogging mechanisms and interplay with biological control of pathogens. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 26.n. 16, p. 8034, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms26168034>

MAIA, M. M. D. Interação genótipo-ambiente em soja via análise de componentes principais com múltiplas matrizes de dados. **Revista Agro@ambiente on Line**, 2014. DOI: <https://doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v8i1.1369>

MARCOS F., J. Fisiologia de sementes de plantas cultivadas. Londrina: **Abrates**. 2015a. Acesso em: 24 Jul. 2026.

MARCOS FILHO, J. Seed vigor testing: an overview of the past, present and future perspective. **Scientia Agrícola**, v. 72, n. 4, p. 363-374, 2015b. DOI: <https://doi.org/10.1590/0103-9016-2015-0007>

MANGUANA, G. D.; ARAÚJO, M. H. C.; CARVALHO-NETO, S.; NOBRE, G. S.; MARTÍNEZ, M. H. P.; OLIVEIRA, M. R.; NASCIMENTO, L. C. Biopriming of soybean seeds with *Bacillus* spp. **Brasilian Journal of Biology**, v. 86, p. e303066, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1590/1519-6984.303066>

MARINKOVIĆ, M.; AL-TABBAA, O.; KHAN, Z.; WU, J. Corporate foresight: A systematic literature review and future research trajectories. **Journal of Business Research**, v. 144, n. 2, p. 289-311, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2022.01.097>

MIRZA, C. C. R.; OLIVEIRA, A. P. S.; MATEUS, M. E. S.; ASOBIA, P. C.; SOUSA, C. M.; DE MELLO FRASCA, L. L.; DE BRITO FERREIRA, E. P. Soybean Crop Response Treated With Different Multifunctional Inoculants Under Field Conditions. **Environmental Microbiology Reports**, v. 18, n.3, p. e70363, 2026. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.emr.2026.03.003>

<https://doi.org/10.1111/1758-2229.70363>

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

NAOE DE-LIMA, A. M.; PELUZIO, J. M.; CAMPOS, L. J. M.; NAOE, L. K.; REINA, E. Effect of water deficit and sowing date on oil and protein contents in soybean co-inoculated with *Azospirillum brasilense*. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 51, p. e66584-e66584, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/1983-40632021v5166584>

NAPIER J.D.; HECKMAN R.W.; JUENGER, T.E. Interações gene-ambiente em plantas: mecanismos moleculares, fatores ambientais e plasticidade adaptativa. **The Plant Cell**, v. 35, n. 1, p. 109-124, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1093/plcell/koac322>

NASIR, M. W.; TOTH, Z. Effect of drought stress on potato production: A review. **Agronomy**, v. 12, n. 3, p. 635, 2022. Doi: [org/10.3390/agronomy12030635](https://doi.org/10.3390/agronomy12030635)

OECD; FAO. OECD-FAO Agricultural Outlook 2020–2029. Paris: OECD Publishing; Rome: **Food and Agriculture Organization of the United Nations**, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1787/1112c23b-en>

OLIVEIRA FILHO, M. A.; SANTOS, A. L. C.; DOMINGUES, R. F.; MELAZZO, G. M.; PONTES, B. S.; DA SILVA, R. J.; CATÃO, H. C. R. M. Validation of Management Zones, Variability, and Spatial Distribution of the Physiological Quality of Soybean Seeds. **Plants**, v. 14, n. 12, p. 1856, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants14121856>

PANDIT, M.; PANTHI, S.; CHILUWAL, A. Biological Nitrogen Fixation in Soybean: Mechanisms, Benefits, Sustainability, and Future Prospects. **Agronomy**, v. 16, n. 10, p. 946, 2026. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy16100946>

PEREIRA, K. K. G.; DAVID, A. M. S. DE-SOUZA.; DOS-SANTOS, S. R.; FIGUEIREDO, J. C.; DA-SILVA, C. D.; NOBRE, D. A. C.; DOS-SANTOS, A. R.; CUSTODIO, D. C. S. Water restriction physiological quality of corn seeds. v. 16, n. 10, 2023. **Contribuciones a las ciencias sociales** DOI: <https://doi.org/10.5590/5/revconv.16n.10-106>

PETER, O.; IMRAN, M.; SHAFFIQUE, S.; KANG, S. M.; ROLLY, N. K.; FELISTUS, C.; LEE, I. J. Combined application of melatonin and *Bacillus* sp. strain IPR-4 ameliorates drought stress tolerance via hormonal, antioxidant, and physiomolecular signaling in soybean. **Frontiers in Plant Science**, v. 15, p. 1274964, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1274964>

RAFAEL, D. D, MARQUES, D. M.; DE-SOUZA, I. R. P.; MAGALHÃES, P. C, DE-ANDRADE, C. D. L.T.; MARRIEL, I. E.; DE-SOUZA, T. C. A coinoculação de *Bacillus* melhora a condutância estomática, a angulação da raiz e o índice de colheita do milho sob déficit hídrico em um sistema de irrigação linear. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 45, n. 4, p. 3124-3137, 2026. Doi: <https://doi.org/10.1007/s00344-026-12057-7>

RAO, P. J. M.; PALLAVI, M.; BHARATHI, Y.; PRIYA, P. B.; SUJATHA, P.; PRABHAVATHI, K. Insights into mechanisms of seed longevity in soybean: a review. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, p. 1206318, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1206318>

RENZETTI, M; FUNCK, D; TROVATO, M. Proline and ROS: a unified mechanism in plant development and stress response?. **Plants**, v. 14, n. 1, p. 2, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants14010002>

SALAZAR-GARCIA, G.; BALAGUERA-LOPEZ, H. E. e HERNANDEZ, J. P. Efeito da bactéria promotora de crescimento vegetal *Azospirillum brasilense* na fisiologia do rabanete (*Raphanus sativus* L.) sob estresse de alagamento. **Agronomy**, v 12, n. 3, p. 726, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy12030726>

SANTANDER, C.; GONZÁLEZ, F.; PÉREZ, U.; RUIZ, A.; AROCA, R.; SANTOS, C.; VIDAL, G. (2024). Melhorando o estado hídrico e a absorção de nutrientes em plantas de alface (*Lactuca sativa* L.) sob estresse hídrico por meio da inoculação com diferentes espécies de *Bacillus* isoladas do deserto do Atacama. **Plants**, v. 13, n. 2, p. 158, 2024. Doi: <https://doi.org/10.3390/plants13020158>

SARAIVA, C. R. C.; PASA, M. S.; VILKE, A. F.; PASA, E. H.; ROSSETTI, C.; TREMEA, M.G TUNES, L. M.; ALMEIDA, A. S. Considerations in the Use of Growth Regulators to Increase the Productivity and Quality of Soybean Seeds. **Revista de Gestão e Secretariado**. v. 17, n. 2, p. e5536, 2026. DOI: <https://doi.org/10.7769/gesec.v17i2.5536>

SHAYMULLINA, G. K.; SAFIN, R. I.; EGOROVA, O. A.; VALIEV, A. R.; KALIMULLIN, M. N. Influence of Endophytic *Bacillus* Bacteria on the Growth and Stress Tolerance of Spring Wheat and Soybean Seedlings. **Russian Agricultural Sciences**, v. 50, n. 6, p. 668-673, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3103/S106836742570017X>

SETLOW, P e CHRISTIE, G. New thoughts on an old topic: secrets of bacterial spore resistance slowly being revealed. **Microbiology and Molecular Biology Reviews**, v. 87, n. 2, p. e00080-22, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1128/mmbr.00080-22>

SHAHZAD, M.; HAYAT, R.; MUJTABA, G.; REHMAN, WU.; NADEEM, M. Biofertilizers in sustainable agriculture: mechanisms, applications, and future prospects **Discover Agriculture**, v. 3, n. 1, p. 224, 2025. Doi: 10.1007/s44279-025-00318-0

SHAFFIQUE, S.; IMRAN, M.; KANG, S. M.; KHAN, M. A.; ASAF, S.; KIM, W. C.; LEE, I. J. Seed Bio-priming of wheat with a novel bacterial strain to modulate drought stress in Daegu, South Korea. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, p. 1118941, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1118941>

SHELKE, D. B.; CHAMBHARE, M. R.; NIKALJE, G. C.; NIKAM, T. D. Improvement of soybean crop for yield, stress tolerance, and value-added products using a transgenic approach. **Advances in Agriculture**, v. 2023, n. 1, p. 8166928, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1155/2023/8166928>

SIDDIKA, A.; RASHID, A. A.; KHAN, S. N.; KHATUN, A.; KARIM, M. M.; PRASAD, P. V.; HASANUZZAMAN, M. Aproveitamento de rizobactérias promotoras do crescimento vegetal, *Bacillus subtilis* e *B. aryabhatai*, para combater o estresse salino no arroz: um estudo sobre a regulação da defesa antioxidante, homeostase iônica e parâmetros fotossintéticos. **Frontiers in Plant Science**, v. 15, p.1419764, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1419764>

SILVA, G. A.; RODRIGUES, D. P.; FONSECA, N. V.; BARBOSA, C. E.; FERREIRA, R. B. Evaluation of the Physiological Quality of Soybean Seeds Subjected to Different Industrial Seed Treatments. **Revista Processos Químicos**, v. 21, n. 38, p. 73-77, 2025. DOI: <https://doi.org/10.19142/rpq.v21i38.806>

SILVA, G. F. D., CHAMMA, L.; LUPERINI, B. C. O.; CHAVES, P. P. N.; CALONEGO, J. C.; NAKAGAWA, J.; SILVA, E. A. A. D. Physiological quality of soybean seeds as a function of soil management systems and pre-harvest desiccation. **Agronomy**, v. 13, n. 3, p. 847, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy13030847>

SWIFT, J.; WU, X.; XU, J.; PROCKO, C.; JAIN, T.; ILLOUZ-ELIAZ, N.; ECKER, J. R. Stress drives plasticity in leaf ageing transcriptional dynamics in *Arabidopsis thaliana*. *Nature Plants*, v. 12, n.4, p. 780-790, 2026. Doi: <https://doi.org/10.1038/s41477-026-02254-3>

YU, B.; CHAO, D. Y. e ZHAO, Y. How plants sense and respond to osmotic stress. **Journal of Integrative Plant Biology**, v. 66, n. 3, p. 394-423, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1111/jipb.13622>

ZHAO, Y.; GUAN, D.; LIU, X.; GAO, G. F.; MENG, F.; LIU, B.; LI, J. Profound change in soil microbial assembly process and co-occurrence pattern in co-inoculation of *Bradyrhizobium japonicum* 5038 and *Bacillus aryabhatai* MB35-5 on soybean. **Frontiers in Microbiology**, v. 13, p. 846359, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.846359>

ZHENG, H.; HUA, S.; LI, Z.; WANG, Z.; ZHAO, D.; JING, C.; JIANG, M. A. Plant Growth-Promoting Bacterial Isolate, *Bacillus velezensis* 41S2, Enhances Seed Protein, Isoflavone Accumulation, and Stress Resilience in Soybean Under Salt–Alkaline Soil Conditions. **Agronomy**, v. 15, n. 9, p. 2103, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy15092103>

ZHU, X; ZHUB, J e WANG, R. Securing soybean seed quality: the critical role of postharvest temperature and atmosphere management on vigor and longevity. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1002/jsfa.70648>

ZONTA, J. H.; DA-SILVA R, J. I.; ZONTA, J. B. *Bacillus aryabhatai* como mitigador do déficit hídrico no cultivo do algodoeiro. **Research, Society and Development**, v.15, n. 2, p. e5215250664-e5215250664, 2206. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v15i2.50664>