

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS (FCAV)
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**EFEITOS DAS BACTÉRIAS *BRADYRHIZOBIUM ELKANII* E *BACILLUS*
ARYABHATAI NO CRESCIMENTO E DESENVOLVIMENTO DE SOJA
(*GLYCINE MAX*) EM CONDIÇÕES DE RESTRIÇÃO HÍDRICA**

Mariana Marcondes Santos

**Jaboticabal - SP
2024**

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS (FCAV)
CÂMPUS DE JABOTICABAL

EFEITOS DAS BACTÉRIAS *BRADYRHIZOBIUM ELKANII* E *BACILLUS*
ARYABHATTAI NO CRESCIMENTO E DESENVOLVIMENTO DE SOJA
(*GLYCINE MAX*) EM CONDIÇÕES DE RESTRIÇÃO HÍDRICA

MARIANA MARCONDES SANTOS

Orientador: Prof. Dr. Everlon Cid Rigobelo
Coorientador: Dr. Carlos Henrique Barbosa Santos

Trabalho apresentado à Faculdade de
Ciências Agrárias e Veterinárias -
UNESP, Câmpus de Jaboticabal, para
obtenção do título de Bacharel em
Ciências Biológicas.

Jaboticabal - SP
2º Semestre/2024

S237e

Santos, Mariana Marcondes

Efeitos das bactérias *Bradyrhizobium elkanii* e *Bacillus aryabhattai* no crescimento e desenvolvimento de soja (*Glycine max*) em condições de restrição hídrica / Mariana Marcondes Santos. -- Jaboticabal, 2024

57 f. : il., tabs., fotos

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Ciências Biológicas) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal

Orientador: Everlon Cid Rigobelo

Coorientador: Carlos Henrique Barbosa Santos

1. Microbiologia agrícola. 2. Soja. 3. Simbiose. 4. Bactérias. 5. Estresse hídrico. I. Título.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Câmpus Jaboticabal



MARIANA MARCONDES SANTOS

EFEITOS DAS BACTÉRIAS *BRADYRHIZOBIUM ELKANII* E *BACILLUS ARYABHATTAI* NO CRESCIMENTO E DESENVOLVIMENTO DE SOJA (*GLYCINE MAX*) EM CONDIÇÕES DE RESTRIÇÃO HÍDRICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, para obtenção do título de Bacharel em Ciências Biológicas.

Área de Concentração: Produção Vegetal

Orientador: Prof. Dr. Everlon Cid Rigobelo

Coorientador: Dr. Carlos Henrique Barbosa Santos

Data da defesa: 29/11/2024

☒ Aprovado

() Reprovado

Banca Examinadora:

Carlos Henrique Barbosa Santos

Dr. Carlos Henrique Barbosa Santos

UNESP – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Campus de Jaboticabal

Edvan Teciano Frezarin

Me. Edvan Teciano Frezarin

UNESP – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Campus de Jaboticabal

Josiane Soares Siqueira

Josiane Soares Siqueira

UNESP – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Campus de Jaboticabal

"ad Referendum"

Aprovado em reunião do Conselho do Departamento em: 02/12/2024

Chalita Martins

Profa. Dra. Cibeles Chalita Martins

Chefe do Departamento

"Don't forget where you belong,
home,
If you ever feel alone, don't —
You were never on your own."

— One Direction

AGRADECIMENTOS

A Deus, por iluminar a minha vida todos os dias, por ouvir meus desabafos, enxugar minhas lágrimas que eram derramadas antes de dormir e por garantir que, no dia seguinte, eu me levantaria firme e forte, pronta para dar mais um passo em direção aos meus sonhos.

À minha mãe, Maria Marcondes, e à minha tia, Isilda Marcondes, por me levarem e buscarem todos os dias no laboratório, me aconselharem sempre que precisei, me ampararem nas crises de ansiedade e não medirem esforços para que eu me sentisse segura.

À minha avó, Maria Inezo, por me amar da forma mais verdadeira, rezando diariamente por minha proteção, sabedoria e força. Obrigada por todas as mensagens que enviou desejando uma boa aula e por tudo que fez por mim, desde todos os cuidados quando eu era apenas um bebê à estar presente na conclusão do meu ensino superior.

À Washington Santos, um tremendo pai, que me fez rir nos momentos difíceis e que me ajudou a carregar, literalmente, o peso da graduação (obrigada por carregar minha bolsa). Sou grata por cuidar de mim, mesmo quando faltava força para cuidar de si.

Ao meu tio, Ari Pureza, por torcer por mim, mais do que torce para o Corinthians. Obrigada por compartilhar seus conhecimentos agrônômicos, oferecendo dicas e me ensinando a valorizar a natureza. Sou grata por você ter me ajudado a realizar meus sonhos e por me inspirar a cuidar das pessoas. Você é um bombeiro extraordinário.

À minha prima, Viviani Gonçalves, que todos os dias me ligava para conversas triviais, me lembrando constantemente do quanto é importante ter alguém com quem contar. Sou grata por todas as risadas que demos juntas e por todas as vezes em que você me ligou, quando eu estava me sentindo sozinha, mesmo sem saber disso.

Às minhas tias-avós, Angelina Inezo e Aparecida Inezo, por sempre se preocuparem comigo, conversarem e se importarem com a minha graduação. Obrigada por torcerem por mim e por estarem presentes em todas as minhas datas comemorativas especiais.

Ao meu cachorro, Piter, que me acompanhou desde a pré-escola até a conclusão da graduação, alegrando meus dias com suas patinhas deslizando pelo chão e suas adoráveis manias de cachorro idoso.

Ao meu melhor amigo, Kaian Rodrigues, que esteve ao meu lado nos momentos mais difíceis da minha vida. Sou grata por você conhecer todas as minhas versões, gostar de todas elas e por sempre estar ao meu lado mesmo com a correria cotidiana. Obrigada por sua amizade sincera e amor incondicional.

Às minhas melhores amigas, Ayra Tebaldi e Talia Peres, que considero como irmãs, não há palavras suficientes para expressar o quanto vocês significam para mim e como foram essenciais para que este trabalho se concretizasse. Obrigada pelas risadas, pelos momentos na cantina imaginando o fim da faculdade, por serem minha força nos momentos mais difíceis. Não consigo imaginar minha vida sem vocês. Sou imensamente grata por tudo que vivemos nesses cinco anos e por tudo que ainda viveremos.

À minha amiga Pollyanna Moimas, que sempre esteve por perto durante a minha infância/adolescência e que agora é minha colega de profissão. Obrigada por fazer parte das minhas memórias mais felizes, por ter me escutado e escolhido biologia para sua vida, pelas risadas e pelos conselhos.

À Beatriz Ricco, que é minha amiga há quase duas décadas, esses anos não são apenas números, são uma trajetória de cumplicidade, desafios e conquistas que compartilhamos lado a lado. Neste momento tão importante da minha vida, quero agradecer por cada palavra de apoio, cada conversa encorajadora e todos os instantes em que sua presença fez a diferença. Agradeço por nada ter mudado entre nós, independente de qualquer obstáculo que enfrentamos durante a vida e em nossa amizade. Bia, obrigada por ser mais que uma amiga, por ser uma irmã de coração e por caminhar comigo nesta jornada com tanta paciência e generosidade, amo e admiro você.

Ao meu professor de biologia do ensino médio, Renato Chaine, minha inspiração para cursar Ciências Biológicas. Muito obrigada, professor. Sem você, minha vida teria seguido um caminho totalmente diferente. Seus ensinamentos me acompanharão para sempre.

À minha psicóloga, Ana Lúcia Teixeira, por me ajudar a enxergar meu potencial, me mostrar todas as possibilidades presentes na minha vida e,

sobretudo, por me guiar no caminho do autoconhecimento e do amor próprio. Obrigada por me salvar.

Agradeço de coração ao Carlos Mascari, por ter me levado em segurança para a faculdade todos os dias. Suas conversas sobre futebol e sobre a vida foram mais importantes para mim do que você imagina. Sou grata por ter me feito rir, me dado força e, principalmente, por ter acreditado no meu potencial, sem nunca duvidar, nem por um instante, do que eu sou capaz de conquistar. Obrigada por todo o apoio e confiança.

A todos do Laboratório de Microbiologia Agrícola, meu mais profundo agradecimento. Vocês não apenas me ajudaram, mas me ensinaram com dedicação e estiveram ao meu lado nos momentos mais desafiadores, trazendo calma e apoio. Guardarei cada um de vocês com muito carinho.

Por fim, mas não menos importante, obrigada ao Sport Club Corinthians Paulista, que, através do futebol, me ensinou a ter paciência, resiliência e que me proporcionou momentos de distração e diversão nos dias que mais precisei.

A todos que mencionei, com muito amor e carinho, expresso minha eterna gratidão.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 OBJETIVOS.....	17
2.1 Geral	17
2.2 Específicos	17
3 REVISÃO DE LITERATURA	19
3.1 Origem da soja	19
3.2 Importância econômica e alimentar da soja no Brasil	20
3.3 Impacto do déficit hídrico na sojicultura.....	21
3.4 Fixação biológica de nitrogênio.....	22
3.5 Solubilização de fósforo	23
3.6 Inoculação de <i>Bacillus aryabhattai</i>	24
3.7 Inoculação de <i>Bradyrhizobium elkanii</i>	25
4 MATERIAL E MÉTODOS	26
4.1 Área de estudo	26
4.2 Adubação	26
4.3 Tratamentos	28
4.3.1 Determinação da quantidade de irrigação	28
4.4 Tratamento das sementes	29
4.5 Semeadura	29
4.6 Microrganismos.....	32
4.6.1 Preparo e inoculação.....	32
4.7 Determinação de altura e diâmetro.....	32
4.8 Determinação de massa seca da parte aérea (MSPA) e massa seca da raiz (MSR)	33
4.9 Determinação da concentração de nitrogênio.....	33
4.10 Determinação da concentração de fósforo	33
4.11 Análise de dados	34
5 RESULTADOS.....	35
5.1 Altura das plantas	35
5.2 Diâmetro das plantas	36
5.3 Massa seca da parte aérea (MSPA) e da raiz (MSR)	36

5.4 Concentração de fósforo da parte aérea (PA) e raiz (PR)	37
5.5 Concentração de nitrogênio da parte aérea (PA) e raiz (PR)	38
5.6 Comparação entre todos os tratamentos submetidos à restrição hídrica	39
5.7 Comparação entre todos os tratamentos submetidos à irrigação total ..	40
5.8 Comparação entre as médias de todos tratamentos com relação à inoculação, coinoculação, irrigação parcial e total	41
6 DISCUSSÃO	43
7 CONCLUSÃO	48
REFERÊNCIAS	49

LISTA DE ABREVIATURAS

Al	Alumínio
CWA	Clima subtropical úmido
F	Ferro
MSPA	Massa seca de parte aérea
NPA	Nitrogênio de parte aérea
NR	Nitrogênio de raiz
P	Fósforo
PPA	Fósforo de parte aérea
PR	Fósforo de raiz
RS	Rio Grande do Sul

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Distribuição das sementes de soja nos vasos	29
Figura 2. Plantas de soja durante a segunda semana pós-semeadura.....	30
Figura 3. Plantas de soja durante a quarta semana pós-semeadura	30
Figura 4. Plantas de soja durante a sétima semana pós-semeadura.....	31
Figura 5. Plantas de soja durante a oitava semana pós-semeadura.....	31
Figura 6. Altura das plantas de soja em diferentes tratamentos	35
Figura 7. Diâmetro das plantas de soja em diferentes tratamentos.....	36
Figura 8. Massa seca de parte aérea e de raízes em diferentes tratamentos	37
Figura 9. Fósforo de parte aérea e de raízes em diferentes tratamentos	38
Figura 10. Nitrogênio de parte aérea e de raízes em diferentes tratamentos	39
Figura 11. Efeitos dos tratamentos à 70% de irrigação	40
Figura 12. Efeitos dos tratamentos à 100% de irrigação	41
Figura 13. Melhor média comparando todos os parâmetros por tratamento e nível de irrigação.....	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Quantidade recomendada de macro e micronutrientes utilizados em experimentos com soja.....	26
Tabela 2. Dose recomendada das fontes de macro e micronutrientes para atender as demandas nutricionais à 100% de adubação	27
Tabela 3. Inoculação/coinoculação de bactérias e quantidade de irrigação nos diferentes tratamentos.....	28
Tabela 4. Dados de absorbância em função da concentração de fósforo	34

RESUMO

A escassez de água é um desafio para a produção agrícola, especialmente em regiões suscetíveis à seca, sendo assim, uma das principais culturas, de importância econômica e alimentar, que pode ter seu rendimento drasticamente afetado pela falta de água é a soja (*Glycine max*). Neste contexto, o uso de microrganismos promotores de crescimento, como as bactérias do gênero *Bradyrhizobium* e *Bacillus*, conhecidas por sua capacidade de fixar nitrogênio atmosférico e estabelecer simbiose com as raízes da soja, estão sendo utilizadas também para aumentar a resistência de plantas ao estresse hídrico, podendo assim representar uma estratégia para diminuir os impactos negativos da deficiência hídrica na soja. Neste sentido, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito dos microrganismos, *Bradyrhizobium elkanii* e *Bacillus aryabhattai*, na produtividade da soja, utilizando delineamento em blocos casualizados contendo 8 tratamentos e 4 repetições. O experimento foi realizado em casa de vegetação na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - UNESP/Jaboticabal, onde as sementes de soja foram submetidas a inoculação e coinoculação das bactérias e concomitantemente sujeitas a dois níveis de disponibilidade hídrica, sendo eles 100% e 70% de irrigação. Posteriormente, foram avaliadas as concentrações de nitrogênio da parte aérea (NPA) e raiz (NR), de fósforo da parte aérea (PPA) e raiz (PR) e o crescimento e desenvolvimento da planta, através do peso da massa seca da raiz (MSR), peso da massa seca da parte aérea (MSPA), diâmetro (D) e altura da parte aérea. Foi possível concluir que a inoculação e coinoculação de microrganismos promotores de crescimento mostrou resultados promissores na diminuição dos efeitos do déficit hídrico, especialmente ao promover um aumento na produção de biomassa em condições de irrigação reduzida, sugerindo que a utilização das bactérias representa uma alternativa sustentável para minimizar os impactos da seca na sojicultura.

Palavras-chave: Eficiência hídrica; Fixação biológica de nitrogênio; Solubilização de fosfato; Sustentabilidade.

ABSTRACT

Water scarcity is a challenge for agricultural production, especially in drought-prone regions. As one of the main crops of economic and nutritional importance, soybean (*Glycine max*) yield can be drastically affected by water deficiency. In this context, the use of growth-promoting microorganisms, such as bacteria from the genera *Bradyrhizobium* and *Bacillus*, known for their ability to fix atmospheric nitrogen and establish symbiosis with soybean roots, is also being utilized to enhance plant resistance to water stress, potentially representing a strategy to mitigate the negative impacts of water deficiency on soybean. The objective of this study was to evaluate the effect of microorganisms, *Bradyrhizobium elkanii* and *Bacillus aryabhattai*, on soybean productivity, using a randomized block design with 8 treatments and 4 repetitions. The experiment was conducted in a greenhouse at the Faculty of Agricultural and Veterinary Sciences - UNESP/Jaboticabal, where soybean seeds were subjected to inoculation and coinoculation of bacteria, and concurrently exposed to two levels of water availability, namely 100% and 70% irrigation. Subsequently, concentrations of nitrogen in the aerial part (APN) and root (RN), phosphorus in the aerial part (APP) and root (RP), and plant growth and development were evaluated through dry root mass (RDM), dry aerial mass (DAM), diameter (D), and aerial part height (APH). It was concluded that the inoculation and co-inoculation of growth-promoting microorganisms showed promising results in reducing the effects of water deficit, particularly by promoting an increase in biomass production under reduced irrigation conditions, suggesting that the use of these bacteria represents a sustainable alternative to minimize drought impacts on soybean cultivation.

Keywords: Biological nitrogen fixation; Phosphate solubilization; Sustainability; Water efficiency.

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a segurança alimentar tornou-se relevante, tanto no âmbito nacional, quanto internacional (Vasconcellos; Moura, 2018). No Brasil, a preocupação com a falta de alimentos intensificou-se devido ao crescimento populacional, que registrou um aumento de 6,5% no último censo demográfico, em 2022, quando comparado com o anterior, feito em 2010 (IBGE, 2023).

O Brasil, que conseguiu sair do mapa da fome em 2015, retornou em 2022, ao totalizar 70,3 milhões de pessoas em estado de insegurança alimentar moderada e 21,1 milhões de pessoas em situação de insegurança alimentar grave ou estado de fome (FAO; IFAD; UNICEF; WFP; WHO, 2023).

Diante desse cenário, a soja (*Glycine max*), produto no qual o Brasil se destaca como o maior produtor mundial, com 46 milhões de hectares de produção na safra 2023/24 (CONAB, 2024), surge como uma grande aliada na luta para garantir a segurança alimentar da população, principalmente por ser uma ótima fonte de proteína e de nutrientes imprescindíveis para a alimentação, como cálcio, ferro e vitaminas (Sediyama, 2009).

Contudo, a prática de combater a insegurança alimentar através da produção agrícola tem apresentado desafios adicionais, especialmente devido ao impacto das mudanças climáticas na produtividade de culturas, tanto no Brasil, quanto no mundo (Zabel *et al.*, 2019; Baldos *et al.*, 2020). Segundo Santos (2024), Carlos Eduardo Cerri destacou que as alterações no clima representam uma ameaça direta à agricultura, com potencial para comprometer o cultivo de alimentos fundamentais para a dieta da população brasileira, como soja, feijão e arroz. Complementando essa perspectiva, Luciano Nakabashi enfatizou que essa situação pode proporcionar mais um desafio para diminuir a insegurança alimentar e a fome.

As mudanças climáticas causadas pelo aquecimento global geram muita preocupação há vários anos. Segundo o último relatório do IPCC (Painel Intergovernamental para a Mudança de Clima) feito em 2023, foi possível afirmar que “As atividades antropogênicas, principalmente através das emissões de gases de efeito estufa, inequivocamente causaram o aquecimento global, com a

temperatura da superfície global atingindo um valor 1,1° C mais alto entre 2011-2020 do que no período de 1850-1900”.

As alterações no clima modificaram os padrões de chuva e aumentaram a intensidade dos eventos climáticos extremos (IPCC, 2023), afetando diretamente a agricultura, sendo assim, estudos que buscam melhorar o rendimento das plantas frente às mudanças climáticas, são de grande relevância no cenário atual.

Uma estratégia adotada para aumentar a produtividade da cultura da soja é a prática da coinoculação de *Bradyrhizobium* com outros gêneros de bactérias promotoras de crescimento vegetal (Zeffa *et al.*, 2020), pois estes microrganismos realizam a fixação biológica de nitrogênio, dispensando a aplicação de fertilizante nitrogenado e além de beneficiar a planta, também contribuem com a economia, pois a substituição de fertilização faz com que seja economizado aproximadamente US\$ 20 bilhões ao ano (Santos; Nogueira; Hungria, 2019).

As bactérias *Bacillus subtilis subs. spizizenii* (Duangkaew; Monkhung, 2021) e *Bacillus aryabhattai* (Farahat *et al.*, 2020, Deng *et al.*, 2022), também estão associadas a coinoculação juntamente com microrganismos do gênero *Bradyrhizobium* sp.

A partir do que foi apresentado, o presente estudo busca analisar os efeitos das bactérias *Bradyrhizobium elkanii* e *Bacillus aryabhattai* no crescimento e desenvolvimento de soja em condições de restrição hídrica, a fim de comprovar se as bactérias promotoras de crescimento podem auxiliar nos processos fisiológicos da soja, ainda que a oleaginosa esteja exposta à mudanças climáticas extremas, como a falta de água.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

O objetivo principal do presente estudo foi analisar os efeitos das bactérias *Bradyrhizobium elkanii* e *Bacillus aryabhattai* no crescimento e desenvolvimento de plantas de soja (*Glycine max*) submetidas a condições de restrição hídrica para compreender a influência da simbiose planta-bactéria na adaptação e resiliência da cultura em ambientes atingidos pela seca.

2.2 Específicos

O objetivo geral exposto foi decomposto pelos seguintes objetivos específicos:

(1) Analisar o desenvolvimento da soja inoculada com *B. elkanii* em comparação a um grupo controle, sob condições de restrição hídrica e irrigação total, visando identificar diferenças nas características morfológicas e fisiológicas das plantas.

(2) Avaliar o crescimento da soja inoculada com *B. aryabhattai* em relação a uma testemunha não inoculada, tanto em condições de falta de água, quanto com irrigação completa, a fim de identificar diferenças significativas nos aspectos morfofisiológicos das plantas.

(3) Comparar o desenvolvimento da soja através da coinoculação de *B. elkanii* e *B. aryabhattai* em relação a um grupo controle, ambos submetidos a condições de déficit hídrico e irrigação total, para identificar distinções nas características morfológicas e fisiológicas das plantas.

(4) Avaliar os efeitos da inoculação das bactérias *B. elkanii* e *B. aryabhattai* na fixação biológica de nitrogênio em condições de restrição e sem restrição hídrica, avaliando o teor de nitrogênio nos tecidos vegetais.

(5) Analisar os efeitos da coinoculação das bactérias *B. elkanii* e *B. aryabhattai* na fixação biológica de nitrogênio, sob condições de irrigação completa e parcial, quantificando o teor de nitrogênio presente nos tecidos vegetais.

(6) Avaliar a concentração de fósforo nos tecidos vegetais (parte aérea e raiz), após a inoculação das bactérias *B. elkanii* e *B. aryabhattai* em condições de restrição e sem restrição hídrica.

(7) Quantificar a concentração de fósforo nos tecidos vegetais (parte aérea e raiz), após a coinoculação das bactérias *B. elkanii* e *B. aryabhattai* em condições de irrigação parcial e total.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Origem da soja

A espécie *Glycine max* (L) Merrill, popularmente conhecida como soja, é pertencente à família Fabaceae e a subfamília Papilionoideae (Nepomuceno; Farias; Neumaier, 2022), tendo se originado na China, onde era utilizada principalmente na alimentação da população há pelo menos 5.000 anos. Os grãos da leguminosa ficaram por mais de 100 anos sendo utilizados apenas no Oriente, pois não havia exportação para o Ocidente (Câmara, 2015), portanto, sua domesticação teve início ainda na China a partir da espécie selvagem *Glycine soja*, que deu origem à *Glycine max* (Hymowitz, 1970). Entretanto, cientistas têm elaborado uma hipótese de que antes da *G. max*, houve uma espécie intermediária, a *Glycine gracilis*, demonstrando que o processo de especiação foi gradual (Kim *et al.*, 2010; Sedivy; Wu; Hanzawa, 2017).

O cultivo da soja na Europa começou após missionários chineses enviarem sementes da leguminosa para um plantio experimental, que ocorreu no Jardim Botânico de Paris, no ano de 1739. Ademais, o professor europeu Friedrich Hamberlandt, em 1876, enviou sementes de soja para diversos países como a Holanda, Hungria e Alemanha, difundindo assim, a sojicultura. Nos Estados Unidos, entretanto, o cultivo da oleaginosa por produtores ocorreu apenas após 1880 (Piper; Morse, 1923, *apud* Bonato; Bonato, 1987).

O primeiro registro da soja no Brasil foi feito por Gustavo D'Utra em 1882, na Bahia (Leal, 1967), entretanto, o professor não atingiu seu principal objetivo, a produção comercial. O fracasso pode ser explicado pelo fato de que, naquela época, a sojicultura era realizada apenas em climas frios ou temperados, diferentemente do Estado da Bahia, que apresenta clima tropical. Em decorrência disso, a soja no Brasil só alcançou sucesso quando foi cultivada no Estado do Rio Grande do Sul, uma região caracterizada pelo clima subtropical (Gazzoni; Dall'Agnol, 2018).

Até metade do século XX, a produção de soja em território brasileiro era destinada, principalmente, para a alimentação de bovinos e suínos. Entretanto,

durante a década de 1950, ocorreu a criação do programa oficial de incentivo à cultura de trigo, o que também impulsionou a sojicultura, devido à sua capacidade de integrar um sistema de sucessão de plantio agronomicamente e economicamente vantajoso (Gazzoni; Dall'Agnol, 2018).

Portanto, o cultivo da soja no Brasil teve seu avanço nos anos 60 e 70, fazendo rotação com a triticultura. Em 18 anos (1958 a 1976), o país aumentou a produção mundial de soja em 15,5% e hoje esse valor dobrou, sendo o Brasil responsável por 30% da produção global. Já na década de 70 a 80, a soja foi cultivada principalmente no Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e em Goiás, no bioma do Cerrado (Câmara, 2015). O crescimento do cultivo ocorreu devido a adaptação da soja ao clima e solo, as técnicas de cultivo criadas pelos Estados Unidos, o interesse de compra no mercado externo e a necessidade de substituição de gordura animal por óleos vegetais (Bonato; Bonato 1987).

3.2 Importância econômica e alimentar da soja no Brasil

Atualmente, a soja é a principal commodity do Brasil, apesar das mudanças climáticas terem afetado a safra de 2023/2024, a produção foi de 147.382 milhões de toneladas em todo o território brasileiro (CONAB, 2024), sendo assim, o país continua sendo o maior produtor mundial da leguminosa e essa produtividade em larga escala está diretamente relacionada às inovações das práticas agrícolas, às pesquisas e às novas tecnologias implantadas na sojicultura, como técnicas para corrigir a acidez do solo, a inoculação de bactérias nas sementes para fixar nitrogênio e a adubação com controle da quantidade de macronutrientes e micronutrientes (Freitas, 2011).

A soja é importante economicamente devido à diversos fatores, como o aumento do produto interno bruto, visto que o PIB total da cadeia da oleaginosa em 2024 deverá ser de aproximadamente R\$ 422 bilhões, o que representa 18% do produto interno bruto do agronegócio brasileiro e quase 4,0% da economia total do Brasil (CEPEA, 2024). Além disso, a leguminosa é de extrema relevância devido a sua exportação, que até setembro de 2024 foi de 89,6 milhões de toneladas (ANEC, 2024). Não menos importante é o uso de biocombustíveis fabricados a partir da soja, que vem crescendo exponencialmente, pois consegue atingir um relevante

tópico atualmente, a energia renovável e também reflete positivamente no PIB (CEPEA, 2024).

É importante salientar que além da importância econômica, a soja apresenta diversas características consideradas significativas e que fazem ela ser um produto de extrema relevância alimentar no Brasil. A oleaginosa é utilizada na alimentação animal, aumentando assim sua demanda, visto que, na bovinocultura, suinocultura e avicultura, os animais são alimentados com rações que possuem até 70% de soja (Vencato *et al.*, 2010, *apud* Carvalho *et al.*, 2023) e posteriormente a sua carne é consumida pela população. Ademais, as refeições dos seres humanos podem conter óleo vegetal, carne feita a base de soja e também bebidas à base de soja, cuja produção, anualmente, têm aumentado 15% (Carrão-Panizzi; Silva, 2011).

3.3 Impacto do déficit hídrico na sojicultura

Entre os diversos fatores que são capazes de influenciar a produtividade agrícola, o clima se destaca por ser incontornável, ainda que existam planos de contenção de danos. Ademais, a incerteza das variações climáticas faz com que as mudanças climáticas sejam uma das maiores causas do aumento da improdutividade das safras de diferentes culturas, como a soja e o milho (CONAB, 2024).

A principal adversidade climática que afeta a produção de grãos é o déficit hídrico, sendo o causador de 50% das perdas mundiais (Farias, 2011), o que causa grande preocupação, pois os eventos climáticos de seca têm ocorrido com mais frequência, devido ao aquecimento global (IPCC, 2023). Levando em consideração a sojicultura, ela é principalmente afetada pelo déficit hídrico, pois necessita de água em dois períodos essenciais para seu desenvolvimento, da semeadura até a emergência e durante o enchimento de grãos (Farias *et al.*, 1989).

A demanda de água da cultura da soja por ciclo pode variar entre 450 mm e 800 mm. Para garantir a germinação adequada, as sementes de soja precisam absorver, no mínimo, 50% de sua massa em água. Nesse estágio, o teor de água no solo deve estar entre 50% e 85% do limite máximo de água disponível. Com o crescimento da planta, a necessidade hídrica aumenta, atingindo o pico durante o

estágio de floração e enchimento de grãos (7 a 8 mm/dia), e diminui depois dessa fase (Cattelan; Câmara, 2011).

Segundo os dados fornecidos pela CONAB sobre a safra 2023/24, a soja foi afetada pelos efeitos do conhecido fenômeno climático El Niño, visto que as regiões Centro-Oeste, Norte e Sudeste sofreram com a seca e a Região Sul foi atingida pela chuva excessiva que atrasou o seu plantio (INMET, 2024), levando a área de crescimento da leguminosa a ter o terceiro menor percentual desde a safra de 2009/10. Além disso, a possível chegada do fenômeno La Niña, pode afetar ainda mais a safra 2024/25 (CONAB, 2024).

3.4 Fixação biológica de nitrogênio

O nitrogênio é o segundo recurso mais importante para o crescimento natural das plantas, perdendo apenas para a água (Franco; Döbereiner, 1994). Ele é encontrado em grandes quantidades na natureza, porém, em uma forma química instável, sendo necessário que ocorra um processo de transformação para que as plantas consigam assimilá-lo, como a fixação biológica de nitrogênio (Marin *et al.*, 1999).

O processo de fixar nitrogênio biologicamente geralmente ocorre pela associação simbiótica das plantas da família Fabaceae com bactérias dos gêneros *Azorhizobium*, *Bradyrhizobium*, *Mesorhizobium*, *Sinorhizobium* e *Rhizobium*. Essa interação ocasiona a formação de nódulos nas plantas, onde a amônia sintetizada é incorporada com íons hidrogênio presentes nas bactérias, formando íons amônio que serão transformados em diferentes formas de nitrogênio orgânico, como aminoácidos, ureídos e amidas, que beneficiam o desenvolvimento da planta. Embora o solo brasileiro não possua essas bactérias naturalmente, a constante inoculação para produção agrícola, criou populações de *Bradyrhizobium* em áreas de cultivo, entretanto, a reinoculação pode aumentar a produtividade do cultivar (Hungria; Campo; Mendes, 2007).

Os grãos de soja possuem grande quantidade de proteína, por conseguinte, é necessário que haja 70 kg de nitrogênio para 875 kg de grãos da leguminosa, sendo assim, em uma produção de proporção elevada, como 4000 kg ha⁻¹, seria necessário, 320 kg de nitrogênio, o que demandaria a utilização do dobro de

fertilizantes nitrogenados, visto que a sua eficiência quase nunca atinge mais do que a metade, sendo assim, uma solução viável é a fixação biológica de nitrogênio, entretanto, ela só é funcional, se a simbiose entre a bactéria e a soja for eficiente, pois o gasto energético da planta para fixar nitrogênio é maior do que para absorvê-lo dos fertilizantes nitrogenados, visto que elas precisam formar nódulos para transformar a amônia em nitrogênio orgânico (Hungria; Campo; Mendes, 2007).

Entretanto, o déficit hídrico pode dificultar o processo biológico de fixação de nitrogênio, como demonstrado pelo estudo conduzido por Sinclair *et al.* (2007), que indicou a fixação biológica de nitrogênio como sendo especialmente sensível à falta de água, revelando ser prejudicada antes da transpiração e da fotossíntese. Ainda segundo Sinclair *et al.* (2007), estudos relatam que plantas que transportam nitrogênio na forma de amidas demonstram menor sensibilidade ao déficit hídrico moderado em comparação com aquelas que transportam ureídeos, como é o caso da soja.

3.5 Solubilização de fósforo

O fósforo é o terceiro recurso mais importante para o crescimento das plantas e apesar dos solos frequentemente apresentarem uma quantidade significativa de fósforo (400–1000 mg kg⁻¹), apenas uma fração limitada (1,00–2,50%) está disponível em sua forma orgânica para ser absorvida pelas plantas, visto que, entre 75–90% do fósforo adicionado é imobilizado por complexos de cálcio, ferro e alumínio, fixando-se rapidamente no solo (Etesami, 2019).

Os solos do Cerrado, onde grande parte das plantações de soja ocorrem, são fortemente afetados pelo intemperismo, característica que explica a sua concentração reduzida de fósforo e afeta diretamente o desenvolvimento das plantas (Demattê; Demattê, 1993). Para que esse problema seja solucionado, da mesma forma que os fertilizantes nitrogenados são utilizados para suprir a falta de nitrogênio no solo, existem também os fertilizantes fosfatados, que têm como objetivo a inserção de fósforo no substrato (Mendes, 2003).

Entretanto, o uso de fertilizantes à base de fósforo não possui uma alta eficiência, pois, para que as plantas absorvam a quantidade suficiente de fósforo, é necessário aplicar grandes volumes desse fertilizante (Brady; Weil, 1996). Isso

não apenas reduz a eficiência do fertilizante, mas também pode contribuir para o acúmulo de resíduos no solo capazes de comprometer a qualidade de corpos d'água (Hart *et al.*, 2004), portanto, para que houvesse uma solução sustentável para esse obstáculo, após a metade do século 20, começaram a ser considerados os microrganismos solubilizadores de fósforo (Mendes, 2003).

As bactérias são capazes de solubilizar fósforo a partir da excreção de ácidos orgânicos e seus prótons associados, como o ácido láctico e málico, que realizam a dissolução do fosfato (Kucey *et al.*, 1989). Ademais, para que as plantas consigam utilizar o P, ele tem que estar em sua forma orgânica, o que ocorre após a ação enzimática de fosfatases e fitases (Pang; Kolenko, 1986). Adicionalmente, em uma pesquisa realizada por Smart *et al.* (1984), as bactérias do gênero *Bradyrhizobium* foram menos eficientes em produzir fosfatase alcalina, do que as do gênero *Rhizobium*, alguns fungos também estão sendo utilizados para a solubilização de fósforo devido a associação micorrízica (Bolan, 1991).

3.6 Inoculação de *Bacillus aryabhattai*

Os microrganismos do gênero *Bacillus* podem ser encontrados na água, solo e ar e são constantemente aplicados como inoculantes em plantas pois eles são facilmente utilizados e conseguem sobreviver em armazenamento (Petras; Casida, 1985). O gênero *Bacillus* é composto por microrganismos Gram-positivos, em formato de bastonetes podendo conter espécies independentes, ou mesmo, simbióticas (Silva *et al.*, 2021). Dentre as muitas estratégias de promoção de crescimento das bactérias do gênero *Bacillus* podemos destacar a produção de fitohormônios e outros metabólicos que estimulam o desenvolvimento das plantas (Miranda *et al.*, 2020); a tolerância a planta à estresses bióticos e abióticos e fazem um trabalho de prevenção e inibição de infecções ocasionadas por patógenos (Hashem *et al.*, 2019). Também podem facilitar a absorção de nutrientes por processos como a fixação biológica de nitrogênio, e apresentam, potencial de biorremediação em solos contaminados (Mattei *et al.*, 2022).

Em território brasileiro, a bactéria ficou conhecida por conseguir promover o crescimento de milho em condições de estresse hídrico, pois ela possui ferramentas fisiológicas contra a dessecação, como a produção de

exopolissacarídeos e biofilme que é capaz de proteger a planta da morte por falta de água (Kavamura, 2012). Adicionalmente, em 2017, estudos com soja foram realizados e comprovaram que *Bacillus aryabhattai* pode promover o crescimento de soja submetidas a estresse hídrico (Park *et al.*, 2017).

3.7 Inoculação de *Bradyrhizobium elkanii*

As bactérias do gênero *Rhizobium* podem ser caracterizadas pela capacidade de fixar nitrogênio quando estão em relação simbiótica com plantas da família Fabaceae, como a soja (Hungria; Campo; Mendes, 2007). Entretanto, foi possível observar que algumas das bactérias possuíam características distintas do gênero mencionado anteriormente, pois eram de crescimento lento, criando um novo gênero chamado de *Bradyrhizobium* (Michel, 2017).

Geralmente, as bactérias do gênero *Bradyrhizobium* se adaptam a ambientes diversos, como a água, de forma endofítica (Rouws *et al.*, 2014) e também através de simbiose e de associações fisiológicas (Michel, 2017), ademais, elas possuem uma ampla distribuição geográfica (Menna *et al.*, 2010).

A utilização de estirpes de *Bradyrhizobium* spp. como inoculantes, foi capaz de economizar US\$ 3 bilhões anualmente em fertilizantes nitrogenados (Hungria *et al.*, 2005). Na sojicultura são utilizadas duas espécies distintas de *Bradyrhizobium*, a *Bradyrhizobium japonicum* e a *Bradyrhizobium elkanii*, que anteriormente eram caracterizadas como uma única espécie, a *Bradyrhizobium japonicum* (Kuykendall *et al.*, 1992).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Área de estudo

O experimento foi conduzido na Casa de Vegetação e no Laboratório de Microbiologia Agrícola da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", câmpus de Jaboticabal - SP (UNESP/FCAV), sob condições controladas de água. Utilizou-se o cultivar 95R95IPRO. Ao todo, o experimento ocorreu em 50 dias, tendo início com a semeadura dos vasos (julho) e fim com o florescimento da cultura (setembro). O clima da região de Jaboticabal é do tipo Cwa, de acordo com a classificação de Köppen, com verão úmido e inverno seco. A unidade da UNESP está localizada na região noroeste do Estado de São Paulo (21° 15' 22" S, 48° 18' 58" W e altitude de 605m).

4.2 Adubação

Foram utilizados vasos de 5 dm³ preenchidos com solo do tipo latossolo adubados de acordo com as recomendações de Malavolta *et al.* (1989) para experimentos em vaso, sendo assim, os macronutrientes e micronutrientes foram fornecidos utilizando as seguintes fontes: uréia (45% N); superfosfato simples (18% P₂O₅, 16% Ca, 8% S); cloreto de potássio (60% K₂O); óxido de magnésio (52% Mg); ácido bórico (17% B); molibdato de sódio (39% Mo); sulfato de cobre (25% Cu); sulfato de zinco (20% Zn); e sulfato de manganês (26% Mn).

Tabela 1. Quantidade recomendada de macro e micronutrientes utilizados em experimentos com soja

Macronutrientes	mg dm ³	Micronutrientes	mg dm ³
Nitrogênio	300	Boro	0,5
Fósforo	200	Cobre	1,5
Potássio	150	Ferro	5,0
Cálcio	75	Molibdênio	0,1

Magnésio	15	Manganês	5,0
Enxofre	50	Zinco	5,0

Fonte: Malavolta (1989).

Dado que o experimento foi conduzido em vasos de 5 L, foram efetuados cálculos para converter os valores de p.p.m (mg kg^{-1} , mg dm^{-3}) e o volume do vaso (5 dm^3) na dosagem de nutrientes necessária para cada vaso.

Então, foram obtidos os valores recomendados para 100% de adubação, calculando a quantidade necessária (em gramas) de cada fonte para atender à demanda de nutrientes específica, conforme mostrado na Tabela 2.

Tabela 2. Dose recomendada das fontes de macro e micronutrientes para atender as demandas nutricionais à 100% de adubação

Adubação 100%	Fonte	g (vaso⁻¹)
Nitrogênio	Ureia	3,30
Fósforo	Superfosfato simples	5,50
Potássio	Cloreto de potássio	1,70
Cálcio	Superfosfato simples	6,25
Magnésio	Óxido de magnésio	0,48
Enxofre	Superfosfato simples	3,12
Boro	Ácido bórico	0,015
Cobre	Sulfato de cobre	0,03
Molibdênio	Molibdato de sódio	0,013
Manganês	Sulfato de manganês	0,058
Zinco	Sulfato de zinco	0,125

Fonte: Malavolta (1989).

4.3 Tratamentos

Após o preenchimento dos vasos com o solo adubado ocorreu a semeadura da soja, que inicialmente teve suas sementes expostas a diferentes tratamentos, demonstrados na tabela 3 a seguir:

Tabela 3. Inoculação/coinoculação de bactérias e quantidade de irrigação nos diferentes tratamentos

Grupo	Tratamentos
1	Irrigação 70% (sem inóculo)
2	Irrigação 100% (sem inóculo)
3	Irrigação 70% + <i>Bradyrhizobium elkanii</i>
4	Irrigação 100% + <i>Bradyrhizobium elkanii</i>
5	Irrigação 70% + <i>Bacillus aryabhattai</i>
6	Irrigação 100% + <i>Bacillus aryabhattai</i>
7	Irrigação 70% + <i>Bacillus aryabhattai</i> + <i>Bradyrhizobium elkanii</i>
8	Irrigação 100% + <i>Bacillus aryabhattai</i> + <i>Bradyrhizobium elkanii</i>

Fonte: Autora (2024).

4.3.1 Determinação da quantidade de irrigação

De acordo com Cerezini (2013), o controle da irrigação foi realizado com base na aplicação de diferentes volumes de água, conforme os tratamentos. As plantas pertencentes aos grupos com irrigação total (100%) receberam um volume de 300 mL de água, garantindo que o solo permanecesse visualmente irrigado, sem causar encharcamento. Para os tratamentos com restrição hídrica, que receberam 70% da capacidade de irrigação, o volume foi ajustado proporcionalmente, resultando na aplicação de 210 mL. Essa redução de 30% foi cuidadosamente monitorada para assegurar a consistência do estresse hídrico imposto, entretanto, este método foi o único utilizado para o controle de água, ou seja, a umidade relativa do ar e do solo não foi levada em consideração.

4.4 Tratamento das sementes

O tratamento de sementes foi realizado com o produto Standak® Top, da BASF, cuja composição inclui os ingredientes ativos piraclostrobina (25 g L^{-1}), tiofanato-metílico (225 g L^{-1}) e fipronil (250 g L^{-1}). Quanto a classificação de classe agrônômica o produto é uma mistura de fungicidas com inseticida. Em relação ao modo de ação é classificado como protetor, sistêmico, contato e de ingestão.

Para o tratamento, diluiu-se a dose recomendada do produto comercial, 0,2 L, em 500 mL de calda para 100 kg de semente. Após a mistura, as sementes foram colocadas sobre papel toalha e à sombra, até a completa secagem para o posterior plantio.

4.5 Semeadura

Foram semeadas 5 sementes de soja em cada vaso, entretanto, após a germinação, foi realizado o desbaste das plantas, mantendo-se 2 plantas por vaso, visando uniformizar o experimento.

As plantas foram distribuídas conforme apresentado na Figura 1.

Figura 1. Distribuição das sementes de soja nos vasos



Fonte: A autora (2024).

Figura 2. Plantas de soja durante a segunda semana pós-semeadura



Fonte: Autora (2024).

Figura 3. Plantas de soja durante a quarta semana pós-semeadura



Fonte: Autora (2024).

Figura 4. Plantas de soja durante a sétima semana pós-semeadura



Fonte: Autora (2024).

Figura 5. Plantas de soja durante a oitava semana pós-semeadura



Fonte: Autora (2024).

4.6 Microrganismos

As bactérias utilizadas nesse estudo foram *B. aryabhattai* e *B. elkanii*, as quais foram obtidas a partir da coleção de microrganismos do Laboratório de Microbiologia Agrícola da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP/FCAV, campus Jaboticabal.

4.6.1 Preparo e inoculação

Os inóculos foram preparados de acordo com a metodologia descrita por Bueno *et al* (2022). Para isso, *B. aryabhattai* foi cultivado em caldo nutriente (extrato de carne 1,5 g L⁻¹; extrato de levedura 1,5 g L⁻¹; peptona bacteriológica 5,0 g L⁻¹; cloreto de sódio – 5,0 g L⁻¹; pH 6,8 ± 0,2) durante 72 horas a 28 °C. *B. elkanii* foi cultivado em meio líquido de extrato de manitol (fosfato de potássio dibásico 0,5 g L⁻¹; sulfato de magnésio heptahidratado 0,2 g L⁻¹; cloreto de sódio 0,1g L⁻¹; manitol 10 g L⁻¹; extrato de levedura 0,4 g L⁻¹; solução de vermelho congo (0,25%) 10mL L⁻¹; pH 6,8 - 7,0 ± 0,2) durante 7 dias a 28 °C.

Após ajustada a concentração dos inóculos (1 x 10⁹ UFC mL⁻¹), 10 mL da suspensão microbiana foram aplicadas sobre o solo de cada vaso com o auxílio de uma pipeta, sendo realizadas duas aplicações.

4.7 Determinação de altura e diâmetro

Após o crescimento e desenvolvimento da planta, a altura (cm) foi determinada medindo da base da planta até o seu ápice utilizando régua graduada. Para realizar a medição do diâmetro do caule foi utilizado um paquímetro digital graduado em 0,1 mm, onde a medida era aferida no colo da planta, aproximadamente 1 cm acima da superfície do solo.

4.8 Determinação de massa seca da parte aérea (MSPA) e massa seca da raiz (MSR)

De acordo com Silva *et al.* (2020), ao final do experimento, realizou-se a coleta da parte aérea da planta e de suas raízes, seguida por uma lavagem em água corrente e subsequente secagem em estufa com circulação forçada de ar a uma temperatura de 65°C até o peso constante da massa seca. Após a secagem, foi feita a pesagem do material utilizando uma balança semi-analítica para determinar a massa seca das raízes (MSR) e da porção aérea (MSPA), posteriormente, as raízes e parte aérea foram moídas em moinho tipo Wiley.

4.9 Determinação da concentração de nitrogênio

A determinação da concentração de nitrogênio foi realizada através da digestão sulfúrica do material, utilizando o método de destilação-titulação Kjeldahl, no qual destilou-se o amônio (NH_4^+) em meio alcalino e posteriormente titulou-o com solução de HCl, de acordo com Miyazawa *et al.* (2009).

4.10 Determinação da concentração de fósforo

Para determinar a concentração de fósforo, foi realizada a digestão nítrico-perclórica do material vegetal, seguido por espectrofotometria, utilizando o método do amarelo-de-vanadato, em que o ânion H_2PO_4^- reagiu em meio ácido com os íons molibdato (MoO_4^{2-}) e vanadato (VO_3^{2-}), formando uma solução de coloração amarela, cuja absorbância era de 420 nm (Miyazawa *et al.*, 2009).

A curva padrão de absorbância foi construída com base nos dados apresentados na tabela 4 abaixo. A equação da reta que descreve a relação entre a absorbância (Abs. 420nm) e a concentração de fósforo (P, em mg L^{-1}) foi ajustada, resultando na equação: $P = 30,68 \cdot A - 0,23$, para determinação da quantidade de fósforo (g kg^{-1}).

Tabela 4. Dados de absorbância em função da concentração de fósforo

Abs. (420nm)	P (mg L ⁻¹)
0,000	0
0,180	5
0,331	10
0,506	15
0,651	20

Fonte: Autora (2024).

4.11 Análise de dados

O delineamento experimental foi em blocos casualizados (DBC) com oito tratamentos e quatro repetições, no esquema fatorial 4 x 2, tendo como fatores: o tipo de inoculação (Controle (sem inoculação), *Bradyrhizobium elkanii*, *Bacillus aryabhattai*, *Bradyrhizobium elkanii* + *Bacillus aryabhattai*) e duas condições hídricas (com e sem restrição hídrica), totalizando 32 vasos.

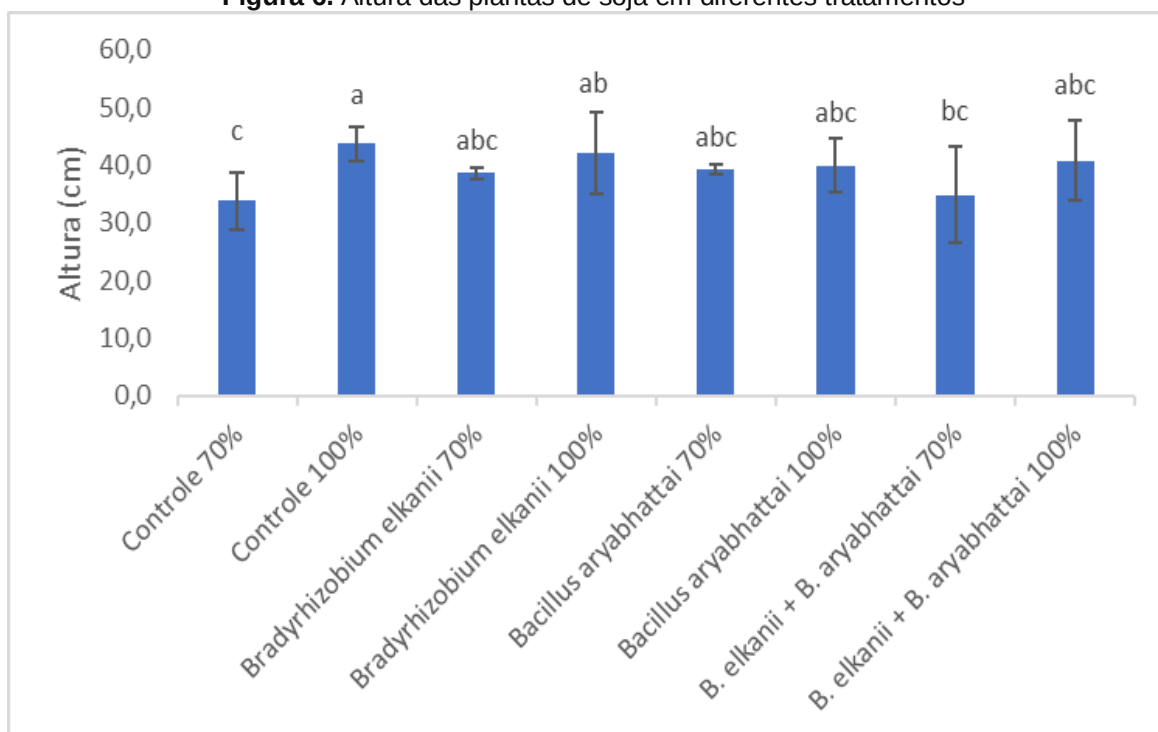
Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância, com aplicação do teste F, utilizando o programa AgroEstat (Barbosa e Maldonado Junior, 2011), quando houve significância realizou-se a comparação de médias pelo teste de Duncan ao nível de 5% de probabilidade. Além disso, gráficos comparativos foram gerados utilizando a linguagem de programação Python (Python Software Foundation, 2024).

5 RESULTADOS

5.1 Altura das plantas

Os resultados obtidos a partir do teste de Duncan para a altura das plantas de soja mostraram diferenças significativas entre alguns tratamentos, com destaque para o tratamento 2, que apresentou a maior altura média. O tratamento 4, também demonstrou uma altura considerável, embora inferior ao tratamento 2. Os tratamentos 3, 5, 6 e 8 não apresentaram diferenças significativas entre eles, entretanto, seus resultados foram inferiores aos dos tratamentos 2 e 4. Ademais, os tratamentos 1 e 7, apresentaram as menores alturas médias.

Figura 6. Altura das plantas de soja em diferentes tratamentos

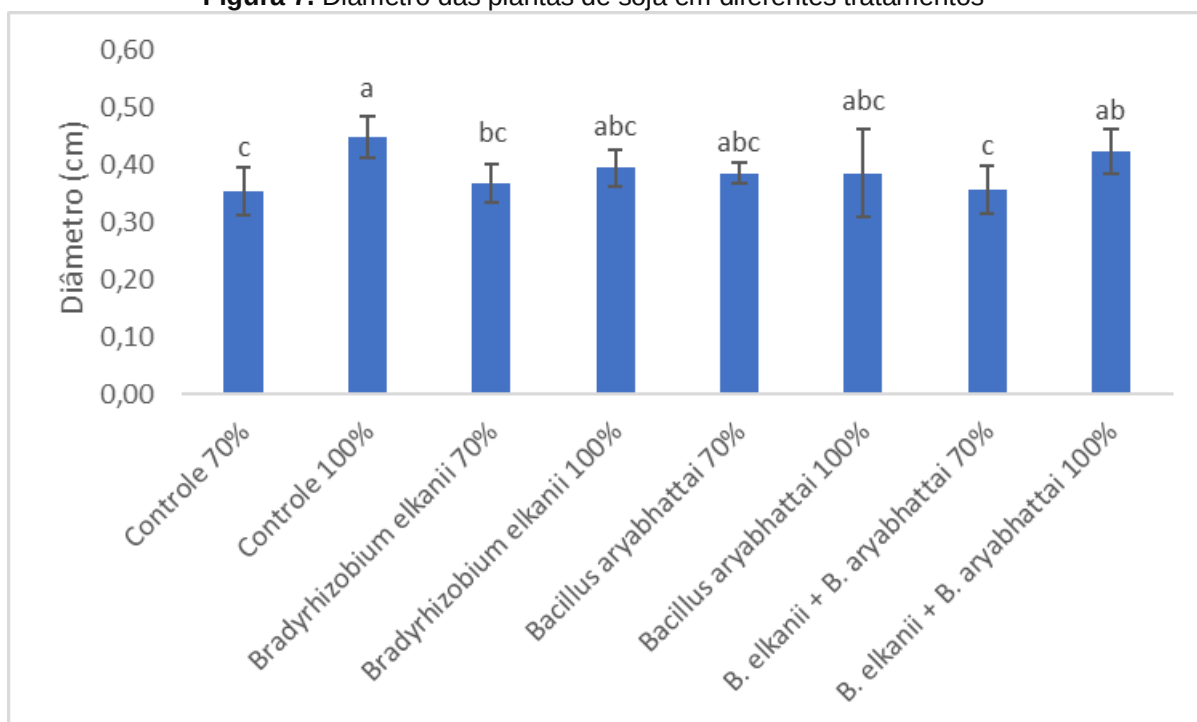


Legenda: Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem de acordo com o teste de Duncan a 5% de probabilidade ($p < 0,05$).

5.2 Diâmetro das plantas

De acordo com os resultados demonstrados no gráfico abaixo, o tratamento 2 apresentou o maior diâmetro médio, seguido pelo tratamento 8, que incluiu a co-inoculação de *Bradyrhizobium elkanii* e *Bacillus aryabhattai* também sob 100% de irrigação. Os tratamentos 4, 5 e 6 não apresentaram diferenças significativas entre si, entretanto, mostraram diâmetros maiores que os tratamentos 1, 3 e 7, ou seja, os tratamentos sob 70% de irrigação foram os que apresentaram os menores diâmetros médios.

Figura 7. Diâmetro das plantas de soja em diferentes tratamentos



Legenda: Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem de acordo com o teste de Duncan a 5% de probabilidade ($p < 0,05$).

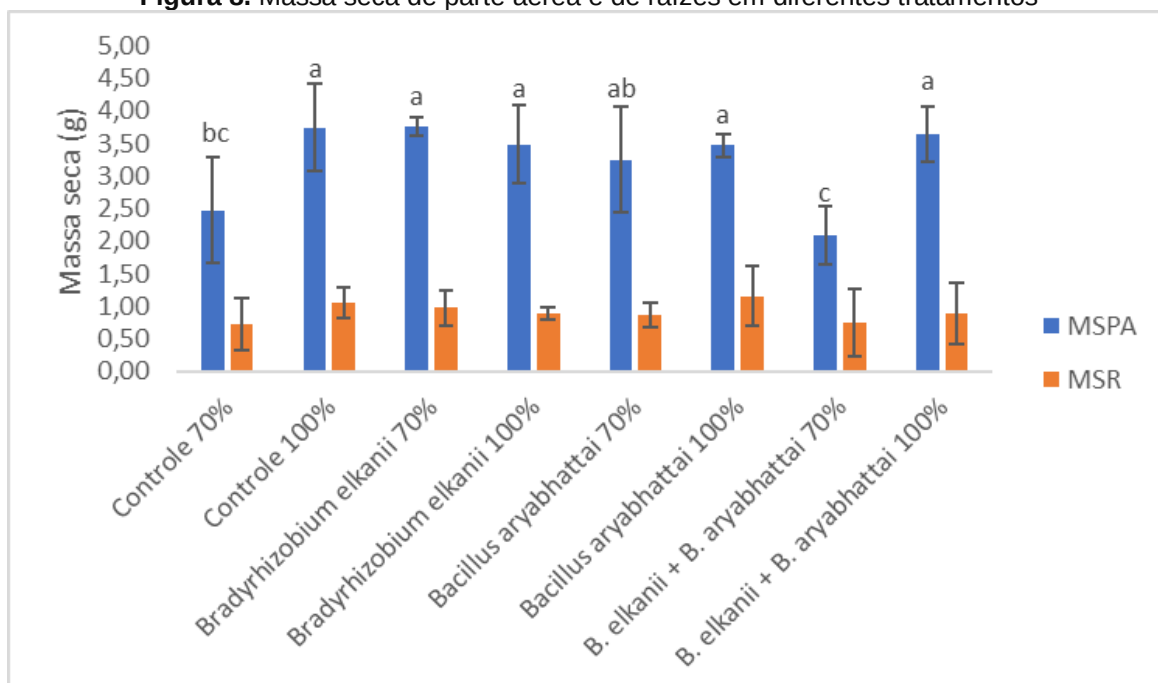
5.3 Massa seca da parte aérea (MSPA) e da raiz (MSR)

Conforme demonstrado no gráfico abaixo, os tratamentos 2, 3, 4, 6 e 8 não apresentaram diferença significativa entre si, indicando que tanto as diferentes condições de irrigação quanto a inoculação bacteriana, isolada ou em co-inoculação, não resultaram em variações significativas da massa seca da parte aérea. Por outro lado, esses tratamentos apresentaram maior quantidade de MSPA, quando comparados aos outros. O tratamento 5 também apresentou

resultados favoráveis. Adicionalmente, os tratamentos que demonstraram menor produção de massa seca da parte aérea foram o 7 e 1, respectivamente.

Para a massa seca da raiz, os dados mostraram que todos os tratamentos obtiveram resultados semelhantes, isso sugere que as condições do experimento, não resultaram em variações significativas na massa seca das raízes.

Figura 8. Massa seca de parte aérea e de raízes em diferentes tratamentos

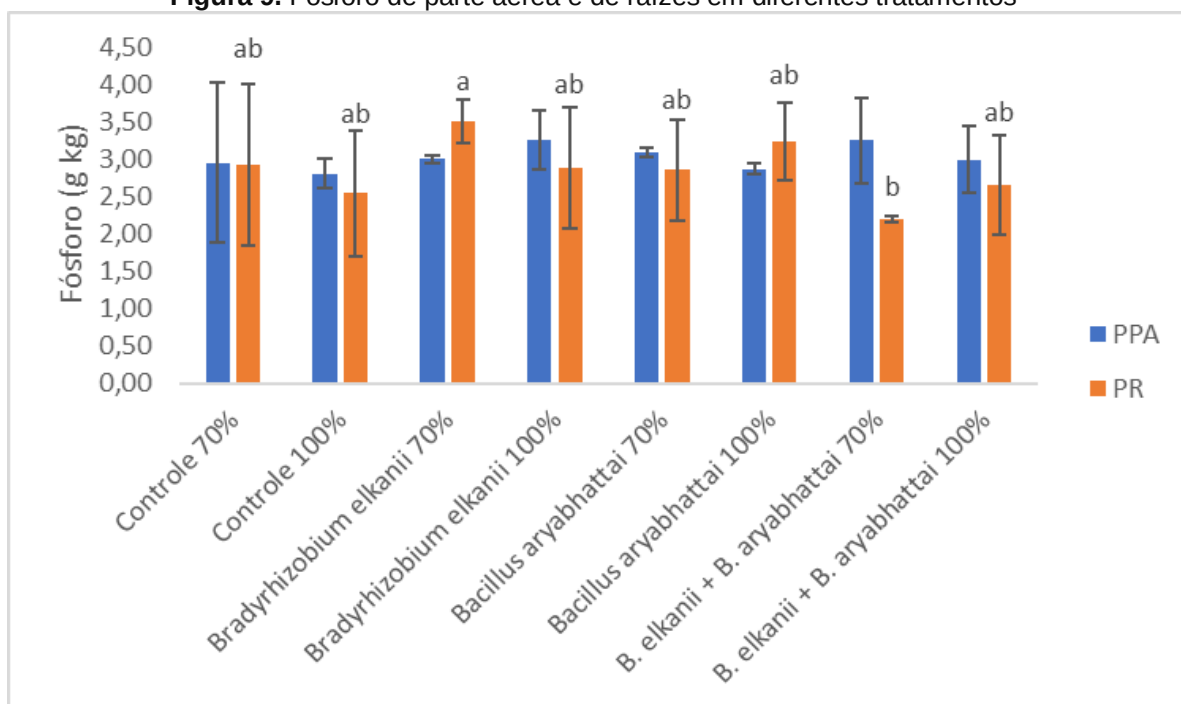


Legenda: Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem de acordo com o teste de Duncan a 5% de probabilidade ($p < 0,05$).

5.4 Concentração de fósforo da parte aérea (PA) e raiz (PR)

Os dados da quantidade de fósforo na parte aérea (PPA) revelaram que, apesar das diferenças nos tratamentos, todos os grupos apresentaram teores parecidos de fósforo, esses resultados sugerem que a inoculação e a irrigação não resultaram em variações significativas.

Na raiz, os resultados do teste de Duncan revelaram diferenças significativas entre os tratamentos, conforme apresentado no gráfico abaixo. O tratamento 3, apresentou o maior teor médio de fósforo na raiz, com 3,51 mg/kg. Os tratamentos 6, 1, 4, 5, 2 e 8 apresentaram teores semelhantes, enquanto o tratamento 7 (2,21 mg/kg) apresentou o menor teor de fósforo radicular.

Figura 9. Fósforo de parte aérea e de raízes em diferentes tratamentos

Legenda: Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem de acordo com o teste de Duncan a 5% de probabilidade ($p < 0,05$).

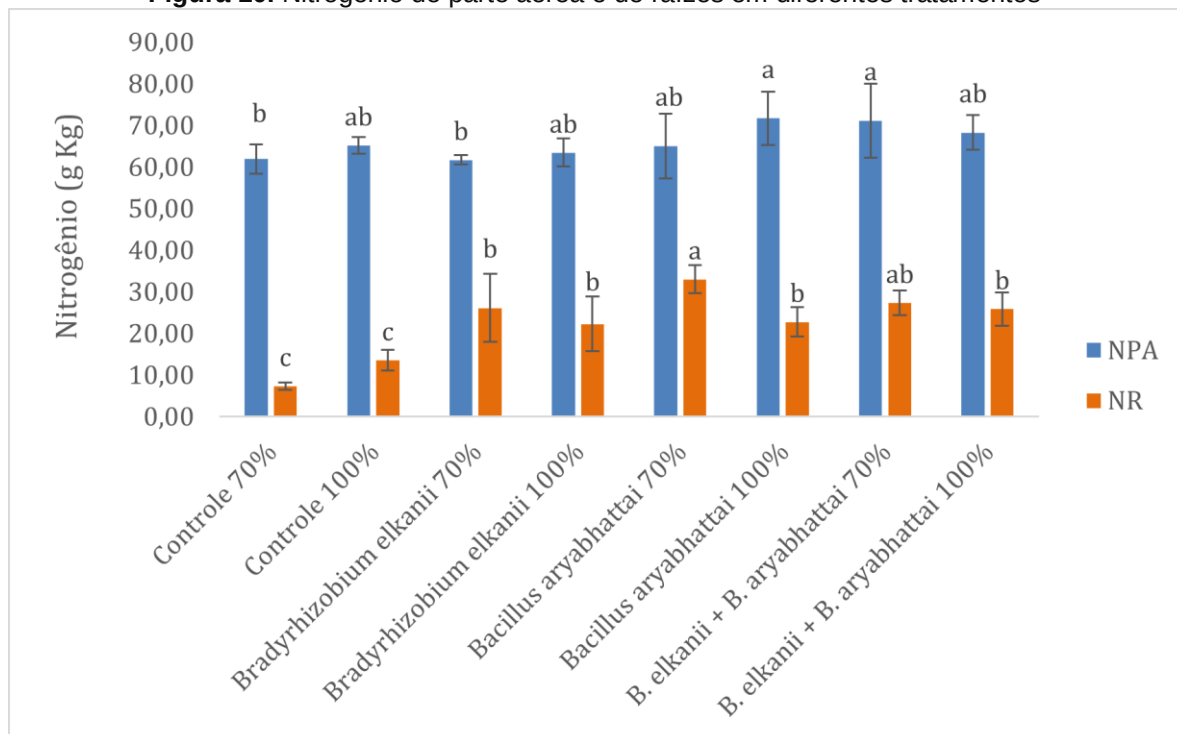
5.5 Concentração de nitrogênio da parte aérea (PA) e raiz (PR)

Os dados da quantidade de nitrogênio na parte aérea (PPA) demonstraram que os tratamentos 6 e 7 apresentaram as maiores concentrações, entretanto, não houve diferença significativa entre eles. Os tratamentos 8, 2, 5 e 4, que possuem concentrações de nitrogênio variando entre 68,3325 mg/kg e 63,490 mg/kg, também não diferiram significativamente entre si, mas foram estatisticamente inferiores aos tratamentos 6 e 7. Por outro lado, os tratamentos 1 e 3 apresentaram as menores concentrações de nitrogênio da parte aérea, com valores de 61,995 mg/kg e 61,765 mg/kg, respectivamente, indicando que eles obtiveram um desempenho inferior em comparação aos outros.

Conforme o gráfico abaixo, os resultados mostraram que o tratamento 5 apresentou a maior concentração de nitrogênio na raiz, com um valor de 33,0675 mg/kg, indicando que este tratamento obteve um desempenho superior. O tratamento 7 também demonstrou uma concentração elevada de nitrogênio, sugerindo que, embora não tenha a mesma eficácia do tratamento 5, ainda é estatisticamente melhor que os outros tratamentos. Os tratamentos 3, 8, 6 e 4 apresentaram valores de concentração de nitrogênio na raiz variando entre 26,1625

mg/kg e 22,3125 mg/kg, não diferindo significativamente entre si. Por fim, os tratamentos 2 e 1 apresentaram as menores concentrações, com 13,5575 mg/kg e 7,3850 mg/kg, sendo assim, esses tratamentos demonstraram um desempenho menor.

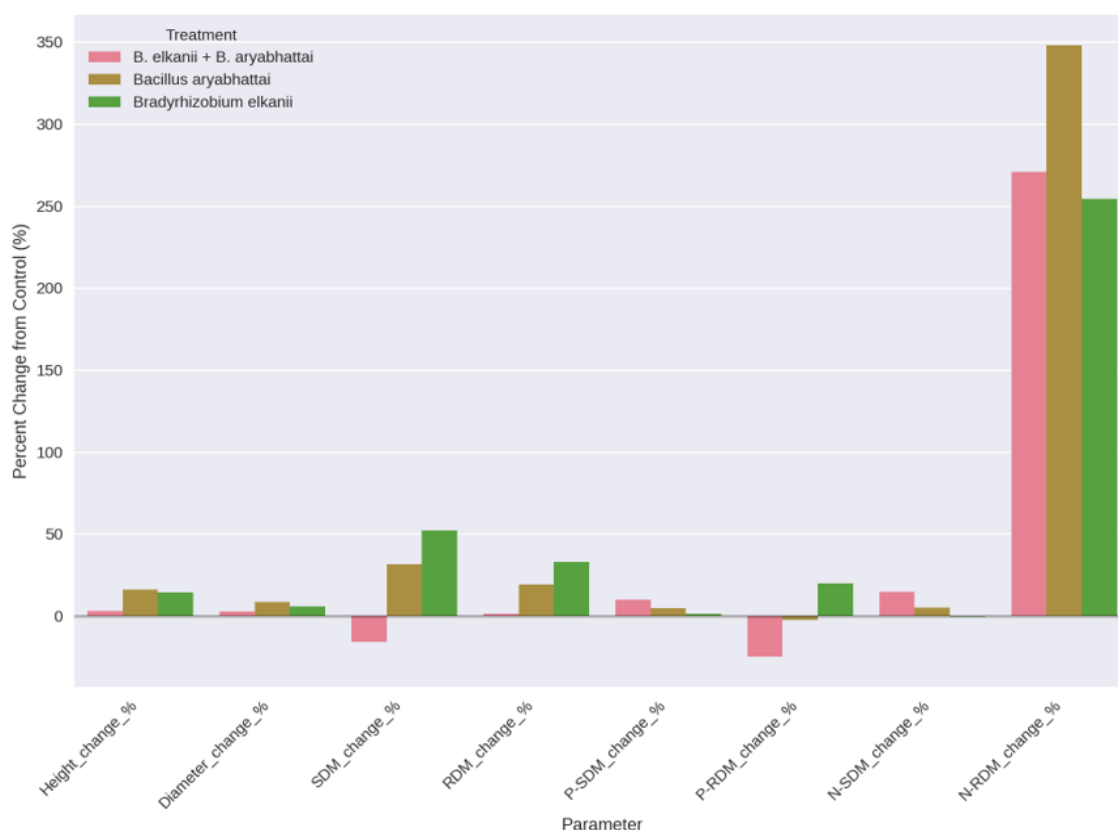
Figura 10. Nitrogênio de parte aérea e de raízes em diferentes tratamentos



Legenda: Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem de acordo com o teste de Duncan a 5% de probabilidade ($p < 0,05$).

5.6 Comparação entre todos os tratamentos submetidos à restrição hídrica

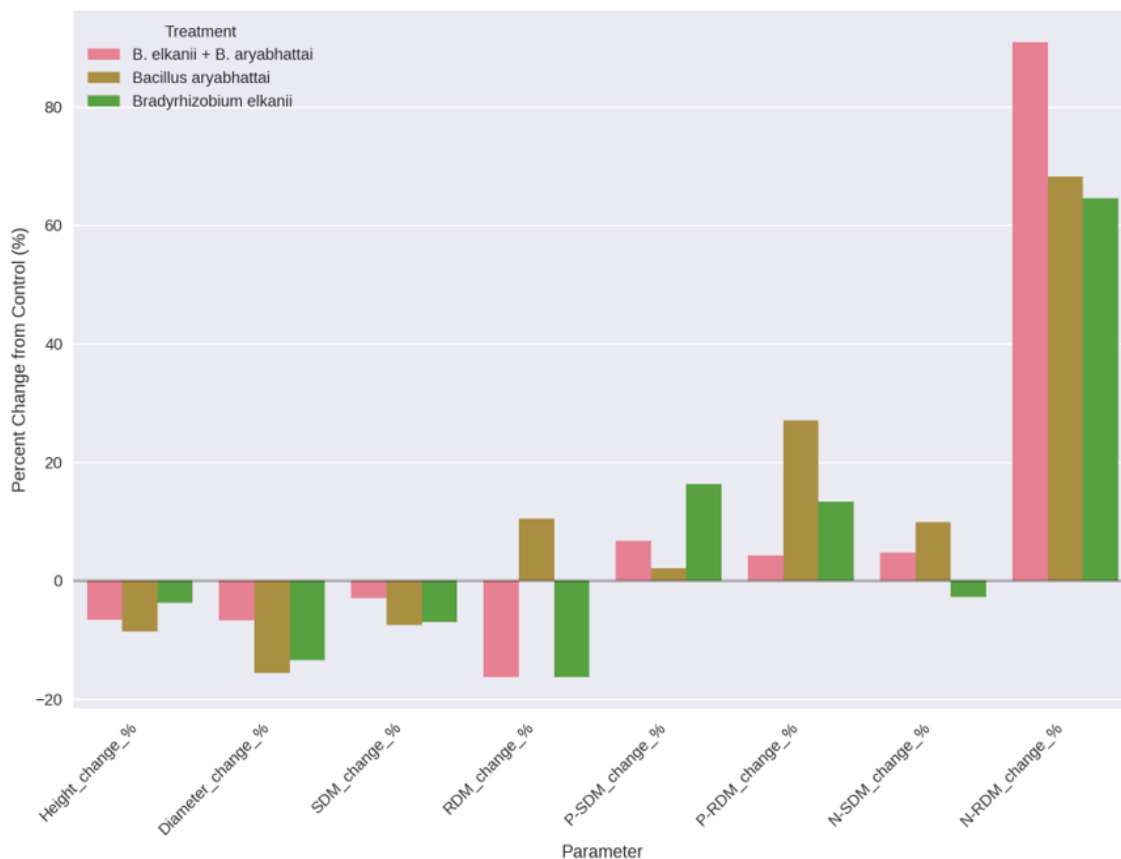
Os dados apresentados na figura abaixo, demonstram que os tratamentos que sofreram com a falta de irrigação completa, apresentaram níveis baixos em quase todos parâmetros aferidos, exceto a concentração de nitrogênio da parte radicular, principalmente com a inoculação de *Bacillus aryabhatai*. Ademais, a 70% de irrigação, a massa seca de parte aérea (MSPA) e a concentração de fósforo da raiz foram os únicos resultados menores do que o grupo controle, quando foram submetidos ao tratamento com a coinoculação bacteriana.

Figura 11. Efeitos dos tratamentos à 70% de irrigação

Legenda: Comparação das médias dos resultados dos parâmetros avaliados, retirando o valor dos grupos controle.

5.7 Comparação entre todos os tratamentos submetidos à irrigação total

Os resultados apresentados na Figura 12, indicam que as únicas variáveis com irrigação total que ultrapassaram os valores do grupo controle, foram as concentrações de fósforo na parte aérea (PPA) e na raiz (PR), além do teor de nitrogênio da raiz (NR), que apresentou o maior resultado, principalmente com a coinoculação das bactérias. No entanto, a concentração de nitrogênio da parte aérea (NPA), apresentou resultados bons, com exceção do tratamento que recebeu a inoculação de *Bradyrhizobium elkanii*. Além disso, a massa seca de raiz apresentou um valor maior do que o grupo controle quando inoculada com *Bacillus aryabhattai*.

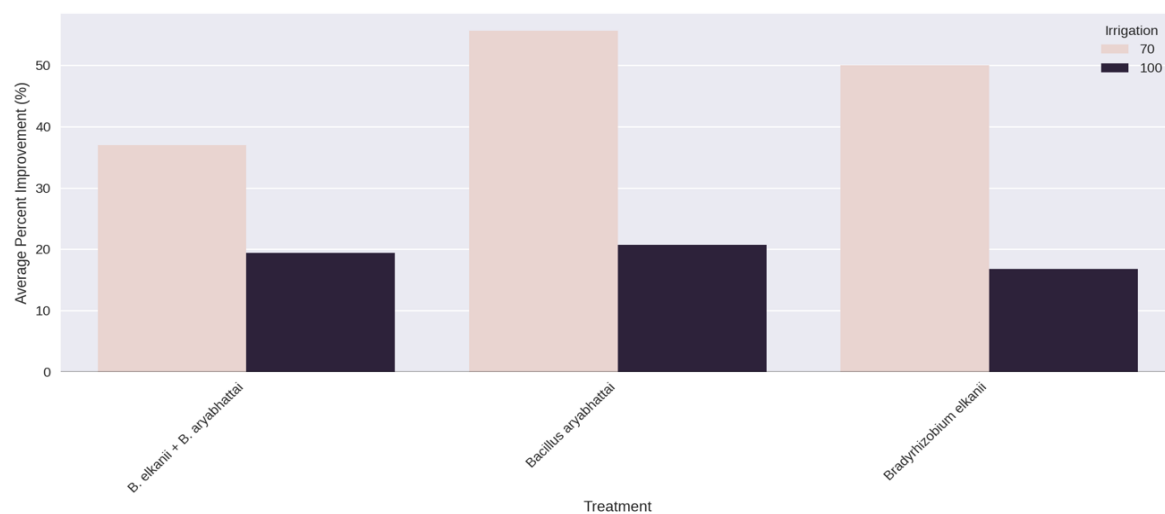
Figura 12. Efeitos dos tratamentos à 100% de irrigação

Legenda: Comparação das médias dos resultados dos parâmetros avaliados, retirando o valor dos grupos controle.

5.8 Comparação entre as médias de todos tratamentos com relação à inoculação, coinoculação, irrigação parcial e total

De acordo com a Figura 13, foi possível observar que todos os tratamentos que foram submetidos à restrição hídrica à 70%, apresentaram melhores resultados em comparação com as plantas que receberam 100% de irrigação. Destaca-se a inoculação com *Bacillus aryabhattai*, que proporcionou um aumento médio de 55,66% nos valores sob menor disponibilidade de água, enquanto que, com irrigação total, o aumento foi de apenas 20,70%.

Figura 13. Melhor média comparando todos os parâmetros por tratamento e nível de irrigação



Legenda: Comparação das médias dos resultados dos parâmetros avaliados, retirando o valor dos grupos controle.

6 DISCUSSÃO

A escassez de água é a principal responsável pela redução do rendimento na sojicultura, especialmente durante a fase de enchimento de grãos, quando a disponibilidade hídrica é crítica. No entanto, durante o experimento, as plantas não avançaram além da fase vegetativa, o que evitou que a falta de água impactasse os resultados de forma mais negativa. Adicionalmente, déficits hídricos, dos leves aos elevados, podem reduzir a fixação de nitrogênio, fazendo com que a produtividade seja comprometida e as sementes tenham menos proteínas (Sinclair, 2007), portanto, os resultados desse estudo demonstraram que o fator irrigação foi determinante para grande parte dos parâmetros analisados, o que foi corroborado pela pesquisa de Cerezini (2013).

A altura das plantas mostrou sua dependência de irrigação total, como observado no tratamento 2, que obteve o maior tamanho. O tratamento 4 também obteve altura considerável, mas ainda inferior ao tratamento apenas irrigado (tratamento 2). Adicionalmente, os tratamentos com 70% de irrigação, especialmente o tratamento 1, apresentaram as menores médias de altura, indicando a importância da irrigação para o desenvolvimento da planta, conforme também demonstrado por Dong *et al.* (2019), que relataram a redução da altura de plantas de soja sob estresse hídrico. Embora Masciarelli *et al.* (2014) tenham reportado que a coinoculação de *B. amyloliquifaciens* e *B. japonicum* em plantas de soja aumentou o crescimento das plantas, os dados do presente trabalho apresentaram uma resposta diferente, indicando que a coinoculação de *Bradyrhizobium elkanii* e *Bacillus aryabhattai* com 100% de irrigação não obteve efeitos totalmente positivos.

Em relação ao diâmetro das plantas, o tratamento 2 novamente se destacou, apresentando o maior diâmetro médio, seguido pelo tratamento 8, que incluiu a coinoculação sob 100% de irrigação. Esses dados corroboram a hipótese de que a disponibilidade hídrica exerce papel fundamental no crescimento do diâmetro da planta. Em um estudo que envolveu a inoculação de *Bacillus aryabhattai* em mudas de cana-de-açúcar, Melo *et al.* (2019) observaram um aumento no diâmetro do caule da cana. No entanto, nesta pesquisa, não foram identificados resultados

significativos em relação ao diâmetro do caule, o que é corroborado pela pesquisa feita com soja por Junior *et al.* (2024). Nos tratamentos com 70% de irrigação, os diâmetros médios foram menores, sendo assim, todos apresentaram diâmetros semelhantes e inferiores aos tratamentos com irrigação completa, com exceção do tratamento 5.

No que se refere à massa seca da parte aérea (MSPA), os tratamentos com inoculação (3, 4 e 6), sem restrição hídrica (2) e com ambas as bactérias em irrigação total (8), não apresentaram diferenças significativas entre si, entretanto, em comparação com os outros tratamentos (1, 5 e 7), eles demonstraram efeitos positivos, de forma semelhante ao estudo realizado por Guo *et al.* (2020), que destacou o impacto positivo da inoculação de rizobactérias na cultura da soja, ao utilizar rizobactérias do gênero *Burkholderia* e detectar o aumento da MSPA em até 67,41%, ressaltando o papel fundamental dessas bactérias na promoção do crescimento vegetal. Adicionalmente, os tratamentos 1 e 7, ambos sob restrição hídrica, sugerem uma tendência de redução na produção de massa seca da parte aérea, especialmente o sétimo tratamento, que apresentou a menor média de MSPA, indicando que a combinação de coinoculação e restrição hídrica pode ser desfavorável para a produção de MSPA.

Para a massa seca das raízes, não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos, sugerindo que a massa seca radicular pode ser menos sensível às variações de irrigação e inoculação em comparação à parte aérea, o que foi evidenciado também na pesquisa de Ohashi *et al.* (2006), onde as plantas de soja submetidas a estresse hídrico tiveram a MSPA e MSR diminuída em 33% e 25% respectivamente, portanto, os resultados sugerem que as raízes sofrem menos que a parte aérea com a falta de água.

A análise do teor de fósforo revelou que na parte aérea não houve diferenças significativas entre os tratamentos, indicando que irrigação e inoculação não influenciaram o acúmulo desse nutriente. Na raiz, contudo, o tratamento 3 (inoculação com *Bradyrhizobium elkanii* e restrição hídrica) destacou-se com o maior teor de fósforo, sugerindo que a bactéria favoreceu a absorção mesmo sob baixa irrigação. Em contraste, o tratamento 7 (coinoculação e restrição hídrica) apresentou o menor teor de fósforo radicular, indicando que a coinoculação pode ser menos eficaz nessas condições. Já os tratamentos 1, 2, 5 e 6 mostraram bons

resultados, alinhando-se a estudos como os de Song *et al.* (2021), que investigam a ação de ácidos orgânicos produzidos por diversas espécies de microrganismos do solo, incluindo *Bacillus aryabhattai*, na solubilização de fósforo.

Nos resultados da concentração de nitrogênio na parte aérea, os tratamentos 6 e 7 apresentaram as maiores concentrações e os tratamentos 1 e 3 apresentaram as menores concentrações, evidenciando uma resposta inferior sob condições de restrição hídrica sem coinoculação. Para a concentração de nitrogênio na raiz, os tratamentos 5 e 7 apresentaram os maiores valores, indicando que a inoculação com *Bacillus aryabhattai* e a coinoculação, respectivamente, tiveram um efeito positivo, mesmo em condições de restrição hídrica. Os resultados do presente estudo são reforçados por Hungria *et al* (1998), que ao realizarem a coinoculação de *Bradyrhizobium elkanii* e *B. japonicum*, obtiveram valores promissores, embora fossem semelhantes aos resultados de apenas uma bactéria inoculada. Por outro lado, os tratamentos 1 e 2, com as menores concentrações de nitrogênio na raiz, evidenciam que, sem inoculação bacteriana, as raízes da soja absorvem menos nitrogênio sob irrigação completa e restrita.

Entretanto, houveram diferenças nas interpretações estatísticas, quando os resultados dos tratamentos foram comparados entre si, retirando os valores dos grupos controle, sendo assim, os novos dados obtidos demonstram que alguns tratamentos submetidos à restrição hídrica, com 70% de irrigação, apresentaram níveis baixos na maioria dos parâmetros aferidos, embora os valores tenham sido maiores em comparação com os tratamentos que receberam irrigação total.

Ademais, a concentração de nitrogênio da parte radicular manteve-se significativamente superiores, principalmente, quando as plantas foram inoculadas com *Bacillus aryabhattai*, mesmo em condições de restrição hídrica, o que é corroborado por Yang *et al.* (2009), que afirmaram que algumas bactérias sintetizam auxinas, fazendo com que haja aumento das raízes das plantas e, aumento na absorção de nutrientes do solo. Este resultado sugere um potencial efeito positivo dessa bactéria na retenção e fixação de nitrogênio, mesmo sob condições de menor disponibilidade de água, o que também pode ser explicado por Dimkpa *et al* (2009), cujo artigo confirmou que algumas bactérias são capazes de estimular a produção de substâncias que realizam a osmorregulação no lugar da planta, fazendo com que elas sejam mais tolerantes à seca.

Além disso, nos tratamentos submetidos a 70% de irrigação, observou-se que a massa seca da parte aérea (MSPA) e a concentração de fósforo na raiz foram os únicos parâmetros que apresentaram valores inferiores ao grupo controle quando submetidos ao tratamento com a coinoculação de *Bradyrhizobium elkanii* e *Bacillus aryabhattai*. Diferentemente do observado por Huang *et al.* (2023), que evidenciaram o uso de coinoculação envolvendo *Claroideogolmus etuicatum* e *Bacillus aryabhattai* como capaz de promover aumento significativo na concentração de fósforo em *Camellia oleifera* em relação ao controle que não recebeu inoculação, o que pode explicar o desempenho positivo da concentração de fósforo na parte aérea, quando a soja recebeu 100% de irrigação.

Foi possível observar que os tratamentos submetidos à restrição hídrica, quando receberam inoculação bacteriana, demonstraram resultados mais eficientes que os tratamentos com irrigação total, visto que um dos únicos parâmetros a apresentar bons resultados nesse contexto foi o nitrogênio radicular quando ambas as bactérias foram inoculadas. Em consequência disso, é importante destacar que a influência benéfica da inoculação e coinoculação, pode estar relacionada com a quantidade de água, sendo assim, as bactérias mostraram ser mais eficientes quando inoculadas em plantas com restrição hídrica, o que pode significar que os microrganismos desempenham melhor seu papel de promotores de crescimento quando há sofrimento nos tecidos vegetais, pois quando as plantas receberam 100% de irrigação e adubação, não era necessário o auxílio das bactérias, visto que a soja já possuía todos os nutrientes essenciais para se desenvolver, diferentemente daquelas submetidas a restrição hídrica, que necessitaram de microrganismos para aumentar moléculas antioxidantes, acumular osmólitos, produzir exopolissacarídeos e biofilmes, fixar nitrogênio e solubilizar fósforo (Yang *et al.*, 2009; Timmusk *et al.*, 2014).

Uma hipótese plausível é a de que a escassez de água pode aumentar a eficiência da ação bacteriana no estímulo ao crescimento das plantas, isso ocorre porque, mesmo em condições de adubação completa, a necessidade das plantas de absorver nutrientes torna-se mais difícil em situações de estresse hídrico. Segundo Kasim *et al.* (2013), bactérias promotoras de crescimento têm a capacidade de induzir a expressão de genes associados à resposta ao estresse hídrico, contribuindo para uma maior tolerância a essas condições adversas. Essa

perspectiva é reforçada pelos achados de Cerezini (2013), que também sugerem esse mecanismo como um fator relevante.

7 CONCLUSÃO

O presente estudo mostrou o quão essencial é a presença de água para o crescimento saudável da soja sem prejudicar sua produtividade, o que foi evidenciado pelos resultados das análises realizadas, onde a maioria dos parâmetros revelou queda no rendimento quando as plantas foram submetidas à escassez de água, ainda que elas estivessem recebendo a inoculação e/ou coinoculação de bactérias promotoras de crescimento.

Em condições de irrigação parcial foi observada uma diminuição significativa na altura, diâmetro e massa seca da parte aérea das plantas. No entanto, a MSPA teve resultados favoráveis com a inoculação e coinoculação de bactérias mesmo recebendo menos água, o que sugere que os microrganismos promotores de crescimento podem ser benéficos para aumentar a produção de biomassa em situações de diminuição de irrigação, sendo assim, a inoculação de microrganismos promotores de crescimento pode ser uma solução para os problemas causados pela seca na sojicultura, visto que, a pesquisa alcançou bons resultados com a inoculação e coinoculação de bactérias em condições de restrição hídrica.

Os dados também indicaram que a junção da inoculação com irrigação completa pode promover a fixação biológica de nitrogênio e a solubilização de fósforo, principalmente nas raízes, ainda que os resultados para irrigação total não tenham sido melhores do que os de irrigação parcial, quando apenas as médias foram comparadas.

Portanto é crucial realizar mais pesquisas, incluindo na área da genética, para aumentar a compreensão sobre a relação entre os microrganismos promotores de crescimento e a capacidade das plantas de resistir ao déficit hídrico. Ademais, levando em consideração as mudanças climáticas constantes, é de extrema importância que sejam desenvolvidas soluções sustentáveis para garantir a sobrevivência da agricultura e, conseqüentemente, de todos os seres vivos.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS EXPORTADORES DE CEREAIS (ANEC). **Statistics 2024**: Brazilian exports of soybeans, soybean meal, maize and wheat. São Paulo, out. 2024. Disponível em: <https://anec.com.br/uploads/cm2byk6v60007rktx2v2z8e1r.pdf>. Acesso em: 20 out. 2024.

BALDOS, U. L. C.; FUGLIE, K. O.; HERTEL, T. W. The research cost of adapting agriculture to climate change: A global analysis to 2050. **Agricultural Economics**, v. 51, n. 2, p. 207–220, 2020.

BARBOSA, J. C.; MALDONADO JÚNIOR, W. **AgroEstat**: system for statistical analysis of agronomic tests. Version 1.0. Jaboticabal: Unesp, 2011.

BOLAN, N. S. A critical review on the role of mycorrhizal fungi in the uptake of phosphorus by plants. **Plant and Soil**, v. 134, p. 189-207, 1991. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00012037>.

BONATO, E. R.; BONATO, A. L. V. **A soja no Brasil**: história e estatística. 1987.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **The nature and properties of soils**. New Jersey: Prentice Hall Inc., 1996.

BUENO, C. B.; SANTOS, R. M.; BUZO, F. S.; SILVA, M. S. R. A.; RIGOBELLO, E. C. Effects of chemical fertilization and microbial inoculum on *Bacillus subtilis* in soybean and maize plants. **Frontiers in microbiology**, v. 13, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.901157>.

CÂMARA, G. **Introdução ao agronegócio soja**. Piracicaba: Departamento de Produção Vegetal – USP, 2015. [LPV 584: Produção de Cana, Mandioca e Soja]. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5746644/mod_resource/content/1/LPV%200584%202017%20-%20REVISAO%20Soja%20Apostila%20Agronegocio%20%282%29.pdf. Acesso em: 16 out. 2024.

CARRÃO-PANIZZI, M.; DA SILVA, J. Soja na alimentação humana: qualidade na produção de grãos com valor agregado. In: CONGRESO DE LA SOJA DEL MERCOSUR – MERCOSOJA, Rosário, 2011. **Anales** [...] Rosario: Asociaci3n de la Cadena de la Soja Argentina (ACSOJA), 2011. p. 1-3. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/265810670_SOJA_NA_ALIMENTACAO_HUMANA_QUALIDADE_NA_PRODUCAO_DE_GRAOS_COM_VALOR_AGREGADO. Acesso em: 20 out. 2024.

CARVALHO, N. S.; RODRIGUES, E. B. S.; SANTANA, T. S.; CANTANHEDE, L. A.; SOUSA, G. M.; SOUSA, R. A.; SILVA FILHO, F. M.; MATOS, R. R. S. da S. Revis3o:

a importância da soja para o agronegócio brasileiro. In: SILVA-MATOS, R. R. S. da.; SILVA, A. L.V. e.; VIEIRA NETO, G. F. (org.). **Fitotecnia, sistemas agrícolas ambientais e solo**. Ponta Grossa: Atena Editora, 2023. p. 52–62.

CATTELAN, A. J.; Câmara, G. M. S.; **Tecnologias de produção de soja: região central do Brasil 2012 e 2013**. Londrina: Embrapa Soja, 2011. 261 p.

CEPEA. **Indústria do biodiesel deve crescer e amenizar queda do PIB total da cadeia**. Rio de Janeiro: Sociedade Nacional de Agricultura, out. 2024. Disponível em: <https://sna.agr.br/industria-do-biodiesel-deve-crescer-e-amenizar-queda-do-pib-total-da-cadeia/>. Acesso em: 19 nov. 2024.

CEREZINI, P. **Efeito da restrição hídrica na fixação biológica de nitrogênio em soja**. 2013. 53 f. Dissertação (Mestrado em Microbiologia) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2013. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/952877>. Acesso em: 31 out. 2023.

CONAB. **Condições dos cultivos de soja, milho, arroz e trigo no Brasil são destaques do Monitoramento Agrícola Global**. Brasília, DF, jun. 2024. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/5567-condicoes-dos-cultivos-de-soja-milho-arroz-e-trigo-no-brasil-sao-destaques-do-monitoramento-agricola-global>. Acesso em: 10 jul. 2024.

CONAB. **Grãos: Safra 2023/24, 12º levantamento**. Brasília, DF, 2024. (Acompanhamento da Safra Brasileira, v. 12, n. 1). Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>. Acesso em: 19 out. 2024.

CONAB. **Grãos: Safra 2024/25, 1º levantamento**. Brasília, DF, 2024. (Acompanhamento da Safra Brasileira, v. 12, n. 1). Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>. Acesso em: 19 out. 2024.

DEMATTE, J. L. I.; DEMATTE, J. A. M. Comparações entre as propriedades químicas de solos das regiões da floresta amazônica e do cerrado do Brasil Central. **Scientia Agricola**, v. 50, n. 2, p. 272–286, 1993.

DENG, C.; ZHANG, N.; LIANG, X.; HUANG, T.; LI, B. *Bacillus aryabhattai* LAD impacts rhizosphere bacterial community structure and promotes maize plant growth. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 102, n. 14, p. 6650–6657, 2022.

DIMKPA, C.; WEINAND, T.; ASCH, F. Plant–rhizobacteria interactions alleviate abiotic stress conditions. **Plant, Cell and Environment**, Germany, v.32, n.1, p.1682–1694, 2009.

DONG, S.; JIANG, Y.; DONG, Y.; WANG, L.; WANG, W.; MA, Z.; YAN, C.; MA, C.; LIU, L. **A study on soybean responses to drought stress and rehydration**. Saudi

Journal of Biological Sciences, v. 26, n. 8, p. 2006-2017, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2019.08.005>. Acesso em: 30 nov. 2024.

DUANGKAEW, P.; MONKHUNG, S. Antifungal activity of *Bacillus subtilis* subsp. spizizenii BL-59 to control some important postharvest diseases of mango fruits (*Mangifera indica* L.). **Intl J Agric Technol**, v. 17, 2053-2066, 2021.

ETESAMI, H. **Eficiência aprimorada do uso de fertilizantes de fósforo com microrganismos**. In: DINÂMICA DE NUTRIENTES PARA PRODUÇÃO AGRÍCOLA SUSTENTÁVEL. 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-981-13-8660-2_8. Acesso em: 30 nov. 2024.

FAO; IFAD; UNICEF; WFP; WHO. The State of Food Security and Nutrition in the World 2023: Urbanization, agrifood systems transformation and healthy diets across the rural–urban continuum. **Rome: FAO**, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.4060/cc3017en>. Acesso em: 5 mar. 2024.

FARAHAT, M. G.; MAHMOUD, M. K.; YOUSEIF, S. H.; SALEH, S. A.; KAMEL, Z. Alleviation of salinity stress in wheat by ACC deaminase-producing *Bacillus aryabhatai* EWR29 with multifarious plant growth-promoting attributes. **Plant Archives**, v. 20, n. 1, p. 417-429, 2020.

FARIAS, J. R. B. Limitações climáticas à obtenção de rendimentos máximos de soja. In: CONGRESO DE LA SOJA DEL MERCOSUR – MERCOSOJA, Rosário, 2011. **Workshops** [...] Rosario: Asociaciones de la Cadena de la Soja Argentina (ACSOJA), 2011. p. 1-4. Embrapa Soja. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/906919/1/farias.limitacoes.pdf>. Acesso em: 17 out. 2024

FARIAS, J. R. B.; NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A. L.; BORDIGNON, J. R. **Produção de grãos de soja em função da ocorrência de déficit hídrico em diferentes fases do desenvolvimento da cultura**. [S.l.]: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia. 1989. Disponível em: <http://www.sbagro.org/files/biblioteca/630.pdf>. Acesso em 19 out. 2024.

FRANCO, A. A.; DÖBEREINER, J. A biologia do solo e a sustentabilidade dos solos tropicais. **Summa Phytopathológica**, São Paulo, v. 20, n. 1, p. 68-74, 1994.

FREITAS, M. C. M. A cultura da soja no Brasil: o crescimento da produção brasileira e o surgimento de uma nova fronteira agrícola. **Enciclopédia Biosfera**, v. 7, n. 12, 2011.

GAZZONI, D. L.; DALL'AGNOL, A. A soja no Brasil é movida por inovações tecnológicas. **Ciência e Cultura**, v. 69, n. 3, p. 69-70, jul. 2018.

GUO, J. K.; ZHAO, J.; REN, X. H.; JIA, H. L.; MUHAMMAD, H.; LV, X.; WEI, T.; HUA, L. Effects of Burkholderia sp. D54 on growth and cadmium uptake of tomato, ryegrass and soybean plants. **International Journal of Environmental Science**

and Technology, v. 17, p. 1149-1158, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13762-019-02571-5>. Acesso em: 30 nov. 2024.

HART, M. R.; QUIN, B. F.; NGUYEN, M, L. Phosphorous runoff from agricultural land and direct fertilizer effects: a review. **Journal of Environmental Quality**, v.33, p.1954-1972, 2004.

HASHEM A.; TABASSUM, B.; FATHI, E.; ALLAH, A. *Bacillus subtilis*: A plant-growth promoting rhizobacterium that also impacts biotic stress. **Saudi Journal of Biological Sciences**, 26:1291-1297. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2019.05.004>.

HUANG, Y.; LIN, Y.; ZHANG, L.; WU, F.; ZHANG, Y.; HUANG, S. Effects of Interaction between *Claroideogolmus etuicatum* and *Bacillus aryabhattai* on the Utilization of Organic Phosphorus in *Camellia oleifera* Abel. **Journal of Fungi**, v. 9, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/jof9100977>. Acesso em: 30 nov. 2024.

HUNGRIA, M.; BODDEY, L. H.; SANTOS, M.; VARGAS, M. Nitrogen fixation capacity and nodule occupancy by *Bradyrhizobium japonicum* and *B. elkanii* strains. **Biology and Fertility of Soils**, v. 27, p. 393–399, 1998. DOI: 10.1007/s003740050449.

HUNGRIA, M.; CAMPO, R. J.; MENDES, I. C. **A importância do processo de fixação biológica do nitrogênio para a cultura da soja**: componente essencial para a competitividade do produto brasileiro. Londrina: Embrapa Soja, 2007. 80 p. (Documentos, 283).

HUNGRIA, M.; FRANCHINI, J.C.; CAMPO, R.J.; GRAHAM, P.H. The importance of nitrogen fixation to soybean cropping in South America. In: WERNER, D.; NEWTON, W.E. (Ed.). **Nitrogen fixation in agriculture, forestry, ecology, and the environment**. Dordrecht: Springer, p.25-42, 2005.

HYMOWITZ, T. On the domestication of the soybean. **Economic Botany**, v. 24, p. 408–421, 1970. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02860745>.

IBGE (ed.). **De 2010 a 2022, população brasileira cresce 6,5% e chega a 203,1 milhões**. [S.l.]: Agência IBGE Notícias, 17 out. 2023. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/37237-de-2010-a-2022-populacao-brasileira-cresce-6-5-e-chega-a-203-1-milhoes>. Acesso em: 5 fev. 2024.

INMET. **El Niño**: saiba como foi a atuação do fenômeno no Brasil: Inmet faz análise sobre as condições climáticas observadas em 2023 e nos três primeiros meses de 2024. Brasília, DF, 25 abr. 2024. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/noticias/el-ni%C3%B1o-saiba-como-foi-a-atua%C3%A7%C3%A3o-do-fen%C3%B4meno-no-brasil#:~:text=%C3%81reas%20dos%20estados%20que%20comp%C3%B5em,n%C3%B3o%20pl%C3%A1ntio%20principalmente%20da%20soja>. Acesso em: 18 jun. 2024

IPCC. **IPCC, 2023**: Climate Change 2023, Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. Geneva, Switzerland, 2023. p. 35-115. doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.

JUNIOR, C. F. G.; SIMONETTI, A. P. M. M.; VALLE, K. J. S. DO. Tratamento de sementes com a utilização de *Bacillus aryabhattai* em diferentes doses na cultura da soja. In: SILVA, L. F. da; OLIVEIRA, J. R. S.; CRUSOÉ, J. M. S. F. **Ciências agrárias: práticas e inovações**. Rio de Janeiro: Atena Editora, 2024. p. 91–102.

KASIM, W. A.; OSMAN, M. E.; OMAR, M. N.; EL-DAIM, I. A. A.; BEJAI, S.; MEIJER, J. Control of Drought Stress in Wheat Using Plant-Growth-Promoting Bacteria. **Journal of Plant Growth Regulation**, Egypt, v.32, n.1, p. 122-130, 2013.

KAVAMURA, V. N. **Bactérias associadas às cactáceas da Caatinga**: promoção de crescimento de plantas sob estresse hídrico. 2012. Tese (Doutorado em Microbiologia Agrícola) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11138/tde-25102012-095956/>. Acesso em: 20 out. 2024.

KIM, M. Y.; LEE, S.; VAN, K.; KIM, T. H.; JEONG, S. C.; CHOI, I. Y.; KIM, D. S.; LEE, Y. S.; PARK, D.; MA, J.; KIM, W. Y.; KIM, B. C.; PARK, S.; LEE, K. A.; KIM, D. H.; KIM, K. H.; SHIN, J. H.; JANG, Y. E.; KIM, K. D.; LIU, W. X.; CHAISAN, T.; KANG, Y. J.; LEE, Y. H.; KIM, K. H.; MOON, J. K.; SCHMUTZ, J.; JACKSON, S. A.; BHAK, J.; LEE, S. H. Whole-genome sequencing and intensive analysis of the undomesticated soybean (*Glycine soja* Sieb. and Zucc.) genome. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 107, n. 51, p. 22032-22037, 2010. DOI: 10.1073/pnas.1009526107.

KUCEY, R. M. N.; JANZEN, H. H.; LEGGETT, M. E. Aumentos mediados microbianamente no fósforo disponível para plantas. **Avanços em Agronomia**, v. 42, p. 199-228, 1989.

KUYKENDALL, L.; SAXENA, B.; DEVINE, T.; UDELL, S. Genetic diversity in *Bradyrhizobium japonicum* Jordan 1982 and a proposal for *Bradyrhizobium elkanii* sp. nov. **Canadian Journal of Microbiology**, v. 38, p. 501-505, 1982. DOI: 10.1139/m92-082.

LEAL, J. C. **Plantas da lavoura Sul Rio-grandense**. Porto Alegre: UFRGS, 1967. 274 p.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, A. S. **Avaliação do estado nutricional das plantas**: princípios e aplicações. Piracicaba: POTAFOS, 1989. 201 p.

MARIN, V. A.; BALDANI, V. L. D.; TEIXEIRA, K. R. dos S.; BALDANI, J. I. **Fixação biológica de nitrogênio**: bactérias fixadoras de nitrogênio de importância para a agricultura tropical. Seropédica: EMBRAPA-CNPAB, 1999. 24 p. (Documentos, 91). Disponível em:

<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/598661/1/doc091.pdf>. Acesso em: 15 out. 2024.

MASCIARELLI, O.; LLANES, A.; LUNA, V. A new PGPR co-inoculated with *Bradyrhizobium japonicum* enhances soybean nodulation. **Microbiological Research**, v. 169, n. 7–8, p. 609-615, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.micres.2013.10.001>. Acesso em: 30 nov. 2024.

MATTEI, D.; PAMPHILE, J. A.; DE OLIVEIRA, J. A. S.; BATTISTUS, A. G. *Bacillus*: an eco- friendly source for plant development and sanity. **Research, Society and Development**, 11:1-13. 2022. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i15.37199>

MELO, S. I.; SILVA, M. F. H. E.; SANTOS, S. M.; RAMOS, P. N.; MAY, A. Promoção de crescimento de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar inoculadas com *Bacillus Aryabhattai* em diferentes frequências de irrigação. Jaguariúna: **Embrapa Meio Ambiente**, p. 14-23, 2019.

MENDES, I. DE C.; R. J. **Microorganismos e disponibilidade de fósforo (P) nos solos**: uma análise crítica. Embrapa: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2003.

MENNA, P.; RIBEIRO, R. A.; HUNGRIA, M. Phylogenetic analysis of nodulation and nitrogen fixation genes of a Brazilian collection of *Bradyrhizobium* strains. [S.l.], 2010. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/877017>. Acesso em: 12 set. 2024.

MICHEL, D. **Descrição de novas espécies de Bradyrhizobium isoladas de Centrolobium paraense**. Orientador: Jerri Édson Zilli. 2017. 79 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, [Seropédica], 2017. Disponível em: <https://tede.ufrjr.br/jspui/bitstream/jspui/2234/4/2017%20-%20Daniele%20Cabral%20Michel.pdf>. Acesso em: 19 fev. 2024.

MIRANDA, L. B.; DOMINGUES, S. C. O.; DOSSO, C.; DE CARVALHO, M. A. C.; YAMASHITA, O. M.; RABELO, H. O. Growth promoters in soybean crop. **South American Journal of Basic Education, Technical and Technological**, 7:469-479. 2020.

MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A.; MURAOKA, T.; CARMO, C. A. F. S.; MELO, W. J. Análise química de tecido vegetal. In: SILVA, F. C. (ed.). **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. rev. ampl. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. p. 191-233.

NEPOMUCENO, A. L.; FARIAS, J. R. B.; NEUMAIER, N. **Características da soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/soja/pre-producao/caracteristicas-da-especie-e-relacoes-com-o-ambiente/caracteristicas-da-soja>. Acesso em: 23 out. 2024.

OHASHI, Y.; NAKAYAMA, N.; SANEOKA, H.; FUJITA, K. Effects of drought stress on photosynthetic gas exchange, chlorophyll fluorescence and stem diameter of soybean plants. **Biologia Plantarum**, v. 50, p. 138–141, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10535-005-0089-3>.

PANG, P. C. K.; KOLENKO, H. Phosphomonoesterase activity in forest soils. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 18, n. 1, p. 35-40, 1986.

PARK, Y. G.; MUN, B. G.; KANG, S. M.; HUSSAIN, A.; SHAHZAD, R.; SEO, C. W.; KIM, A.Y.; LEE, S. U.; OH, K. Y.; LEE, D. Y.; LEE, I. J.; YUN, B. W. *Bacillus aryabhatai* SRB02 tolerates oxidative and nitrosative stress and promotes the growth of soybean by modulating the production of phytohormones. **Plos One**, v. 12, n. 3, p. e0173203, 2017. DOI: 10.1371/journal.pone.0173203.

PETRAS, S. F.; CASIDA, L. E. Survival of *Bacillus thuringiensis* spores in soil. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 50, n. 6, p. 1496-1501, dez. 1985. DOI: 10.1128/aem.50.6.1496-1501.1985.

Python Software Foundation. Python Language Reference, version 3.x. Disponível em: <https://www.python.org/>. Acesso em: 18 nov. 2024.

ROUWS, L. F.; LEITE, J.; DE MATOS, G. F.; ZILLI, J. E.; COELHO, M. R.; XAVIER, G. R.; FISCHER, D.; HARTMANN, A.; REIS, V. M.; BALDANI, J. I. Endophytic *Bradyrhizobium* spp. isolates from sugarcane obtained through different culture strategies. **Environmental Microbiology Reports**, v. 6, n. 4, p. 354-363, 2014. DOI: 10.1111/1758-2229.12122.

SANTOS, A. Mudanças climáticas afetam a agricultura e prejudicam a produção de alimentos: entrevista com Carlos Eduardo Cerri e Luciano Nakabashi. *Jornal da USP*, São Paulo, 5 mar. 2024. Disponível em: <https://jornal.usp.br/?p=728382>. Acesso em: 9 mai. 2024.

SANTOS, M. S.; NOGUEIRA, M. A.; HUNGRIA, M. Microbial inoculants: reviewing the past, discussing the present and previewing an outstanding future for the use of beneficial bacteria in agriculture. **AMB Express**, v. 9, p. 205, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13568-019-0932-0>.

SEDIVY, E.; WU, F.; HANZAWA, Y. Soybean domestication: the origin, genetic architecture and molecular bases. **The New Phytologist**, v. 214, p. 10-11, 2017. DOI: <https://nph.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/nph.14418>

SEDIYAMA, T. **Tecnologias de produção e usos da soja**. Londrina: Ed. Mecenaz, 2009. 314 p.

SILVA, M. A; NASCENTE, A. S.; FILLIPPI, M. C. C.; LANNA, A. C.; SILVA, G. B.; SILVA, J. F. A. Microrganismos promotores de crescimento individuais e combinados afetam a produção de biomassa, as trocas gasosas e o conteúdo de nutrientes nas plantas de soja. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 33, n. 3, p. 619-632, 2020.

SILVA M. E. C.; RODRIGUES, R. D.; ULIAN, A. A. Revisão das propriedades metabólicas do *Bacillus subtilis* e suas aplicações biotecnológicas favoráveis à biocenose. **Revista Multidisciplinar em Saúde**, 2(2), 01, 2021. <https://doi.org/10.51161/remis/1157>.

SINCLAIR, T. R.; PURCELL, L. C.; KING, C. A.; SNELLER, C. H.; CHEN, P.; VADEZ, V. Drought tolerance and yield increase of soybean resulting from improved symbiotic N₂ fixation. **Field Crops Research**, v. 101, n. 1, p. 68-71, 2007.

SMART, J.B.; DILWORTH, M.J.; ROBSON, A.D. Effect of phosphorus supply on phosphate uptake and alkaline phosphatase activity in Rhizobia. **Archives of Microbiology**, Heidelberg, v.14, p.281-286, 1984.

SONG, C.; WANG, W.; GAN, Y.; WANG, L.; CHANG, X.; WANG, Y.; YANG, W. Growth promotion ability of phosphate-solubilizing bacteria from the soybean rhizosphere under maize-soybean intercropping systems. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 102, n. 4, p. 1430-1442, 2021. DOI: 10.1002/jsfa.11477.

TIMMUSK, S.; EL-DAIM, I. A. A.; COPOLOVICI, L.; TANILAS, T.; KANNASTE, A.; BEHERS, L.; NEVO, E.; SEISENBAEVA, G.; STENSTROM, E.; NIINEMETS, U. Drought-tolerance of wheat improved by rhizosphere bacteria from harsh environments: enhanced biomass production and reduced emissions of stress volatiles. **PLoS ONE**, v. 9, n. 5, e96086, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0096086>.

VASCONCELLOS, A. B. P. DE A.; MOURA, L. B. A. de. Segurança alimentar e nutricional: uma análise da situação da descentralização de sua política pública nacional. **Cadernos de Saúde Pública**, São Paulo, v. 34, n. 2, p. e00206816, 2018.

YANG, J.; KLOEPPER, J. W.; RYU, C. M. Rhizosphere bacteria help plants tolerate abiotic stress. **Trends in Plant Science**, USA, v.14, n.1, p. 1-4, 2009.

ZABEL, F.; DELZEIT, R.; SCHNEIDER, J.; et al. Global impacts of future cropland expansion and intensification on agricultural markets and biodiversity. **Nature Communications**, v. 10, p. 2844, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-019-10775-z>.

ZEFFA, D. M.; FANTIN, L. H.; KOLTUN, A.; OLIVEIRA, A. L.; NUNES, M. P.; CANTERI, M. G.; GONÇALVES, L. S. Effects of plant growth-promoting rhizobacteria on co-inoculation with Bradyrhizobium in soybean crop: a meta-analysis of studies from 1987 to 2018. **Peer J**, v. 8, p. e7905, 2020.