



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS DO SOLO
GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

KELE DA SILVA MOTA

CONTRIBUIÇÃO DE *Bacillus aryabhattai* E SILÍCIO EM *Mimosa caesalpinifolia* SOB
ESTRESSE HÍDRICO: RESPOSTAS MORFOFISIOLÓGICAS E ATIVIDADE
BIOLÓGICA DO SOLO

FORTALEZA-CE

2025

KELE DA SILVA MOTA

CONTRIBUIÇÃO DE *Bacillus aryabhattai* E SILÍCIO EM *Mimosa caesalpiniiifolia* SOB
ESTRESSE HÍDRICO: RESPOSTAS MORFOFISIOLÓGICAS E ATIVIDADE
BIOLÓGICA DO SOLO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Curso de Graduação em Agronomia do Centro
de Ciências Agrárias da Universidade Federal
do Ceará, como requisito parcial à obtenção do
título de bacharel em Agronomia.

Orientador: Prof. Dr. Arthur Prudêncio de A.
Pereira.

Co-orientador: Kaio Gráculo Vieira Garcia

FORTALEZA-CE

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M871c Mota, Kele da Silva.

Contribuição de *Bacillus aryabhattai* e silício em *Mimosa caesalpinhiifolia* sob estresse hídrico : respostas morfofisiológicas e atividade biológica do solo / Kele da Silva Mota. – 2025.
52 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Curso de Agronomia, Fortaleza, 2025.

Orientação: Prof. Dr. Arthur Prudêncio de Araujo Pereira.

Coorientação: Prof. Dr. Kaio Gráculo Vieira Garcia.

1. Rizosfera. 2. Qualidade de mudas. 3. Fisiologia vegetal. 4. Atividade microbiana do solo. I. Título.
CDD 630

KELE DA SILVA MOTA

CONTRIBUIÇÃO DE *Bacillus aryabhattai* E SILÍCIO EM *Mimosa caesalpinifolia* SOB
ESTRESSE HÍDRICO: RESPOSTAS MORFOFISIOLÓGICAS E ATIVIDADE
BIOLÓGICA DO SOLO

Monografia apresentada ao Curso de Graduação
em Agronomia do Centro de Ciências Agrárias
da Universidade Federal do Ceará, como
requisito parcial à obtenção do título de bacharel
em Agronomia.

Aprovada em: 23/07/2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Arthur Prudêncio de Araujo Pereira (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dr. Kaio Gráculo Vieira Garcia (Co-orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dr. Wardsson Lustrino Borges
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA)

A Deus,

A minha mãe, Maria do Socorro,

Ao meu pai, Josenias (*In memoriam*),

Aos meus avós (*In memoriam*).

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo amor, força, sabedoria e discernimento, tudo Dele para Ele e por Ele, toda Honra e Gloria pelos séculos dos séculos. À minha mãe e rainha dos céus Maria, por interceder por mim. Ao Pai Seráfico São Francisco de Assis, pela sua vida de santidade e devoção que me ensina sempre a respeitar e amar a Casa Comum e todos que nela habita.

À minha mãe, Maria do Socorro, por sempre me apoiar e me incentivar ir em busca dos meus sonhos e objetivos, pelo seu amor, suas orações e entrega, uma mulher nascida e criada no semiárido nordestino, infância difícil, mas cheia de esperanças, desejo e quero te orgulhar cada vez mais.

Ao meu pai, Josenias (*In memoriam*), pelos seus incentivos aos meus sonhos, pelo seu sonho de ter uma filha formada, obrigada por tudo meu pai, quero te honrar sempre.

Aos meus avós (*In memoriam*), pelo amor, cuidado e carinho, pelo sonho de vocês de me vê formada, todos incentivos e encorajamento.

À toda minha família que viveu esse sonho comigo, me apoiando e torcendo. Aos minha amiga de infância Thais, meus amigos do colégio Bruno, Jordana, Taynara, Vitória Vanessa, Aninha, Alice e Amanda, minha amiga Vitória do cursinho pré-vestibular, que sempre acreditaram no meu potencial.

Ao Prof. Dr. Arthur Prudêncio de Araujo Pereira, pela excelente orientação e incentivo. Por ser um ótimo professor que ensina com maestria, me apresentou a esse mundo da microbiologia do solo e me fez ter a certeza na escolha da minha área de estudo. Pela oportunidade e confiança em apresentar esse tema e por me acolher no Grupo de Estudos de Microbiologia e Biotecnologia do Solos (GEMBioS) ao longo de 2 anos.

Ao Dr. Kaio Gráculo Vieira Garcia, por toda orientação, dedicação, disposição e incentivo. Sua ajuda foi essencial na minha vida acadêmica e pessoal também, com suas brincadeiras e jeito leve de seguir a vida. Agradeço também ao Dr. Wardsson Lustrino Borges, pela orientação, incentivos, conselhos e pela oportunidade de ser bolsista de IC da Embrapa Agroindústria Tropical no laboratório de Microbiologia do Solo enriquecendo mais minha experiencia e conhecimento na área científica. Ademais, fico agradecida a ambos por aceitarem compor a banca examinadora, pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Aos meus primeiros Professores Orientadores, Dr. Magno Jose Duarte Candido e Dr. Claudivan Feitosa de Lacerda, pela oportunidade em participar do Núcleo de Ensino e Extensão em Forragicultura e da monitoria na disciplina de Agrometereologia, engrandecendo meu currículo e meus conhecimentos.

Á Dra. Neiliane, Dimas, Cartaxo, Fabio e toda a equipe da DISAV/ADAGRI, pela oportunidade, confiança, conselhos e incentivos durante 2 anos de estágio na agência, anos de muito conhecido adquirido, amizades feitas que com certeza me moldaram e me tornaram uma profissional mais qualificada.

Aos integrantes do GEMBioS, MSc. Luan, MSc. Elane, Miguel, Alberto, Elizeth e especialmente ao MSc. Murilo por todo apoio, amizade e colaboração na minha monografia, sem vocês com certeza o final do curso teria sido mais difícil.

Aos integrantes do laboratório de microbiologia e de ciências dos solos da EMBRAPA, Alice, Joseph, Natanael, Michael, Erika e especialmente a Lilian e a Vanessa por todo incentivo, conselhos e amizade.

Aos demais amigos da graduação e não menos importantes pois a presença deles na minha vida acadêmica foi essencial para suportar todas as dificuldades com mais leveza e alegria, Wesley, Raylane, Icaro, Marília, Savio, Gabi e Matheus.

Á minha querida amiga Gaby que merece um parágrafo somente para ela, por sua pessoa ser tão importante para mim. Provérbios 18:24 afirma: Ao homem que tem muitos amigos, amigos é; mas há amigo mais chegado do que um irmão. E ela é realmente como uma irmã, obrigada por sempre acreditar mesmo quando nem eu acredito.

“Comece fazendo o que é necessário, depois o que é possível, e de repente você estará fazendo o impossível.” (SÃO FRANCISCO DE ASSIS).

RESUMO

Mimosa caesalpiniiifolia Benth. (sabiá) é uma leguminosa nativa com uso em sistemas agroflorestais, recuperação de áreas degradadas e produção de madeira. Apesar de rústica, suas mudas são sensíveis ao déficit hídrico na fase inicial, o que compromete seu desempenho, especialmente em regiões semiáridas. Estratégias sustentáveis, como o uso de micro-organismos promotores de crescimento vegetal e elementos benéficos como o silício (Si), têm sido estudadas para aumentar a tolerância ao estresse hídrico. *Bacillus aryabhattai* destaca-se por sua capacidade de solubilizar fósforo, produzir fitohormônios e estimular a atividade microbiana. O silício, por sua vez, contribui na mitigação de estresses abióticos, fortalecendo estruturas vegetais e ativando mecanismos antioxidantes. Este estudo avaliou os efeitos da inoculação com *B. aryabhattai* e da aplicação de silício sobre o crescimento, a fisiologia vegetal e a atividade microbiana do solo em mudas de sabiá submetidas a condições de estresse hídrico, em diferentes lâminas de irrigação (50% e 100% da capacidade de campo). O experimento foi conduzido em casa de vegetação, em delineamento inteiramente casualizado (fatorial 2×4), considerando: i) tratamentos (controle, *B. aryabhattai*, Silício, *B. aryabhattai*+Silício) e ii) lâminas de irrigação (50% e 100%), com quatro repetições. Foram avaliadas variáveis morfológicas, índices de qualidade, pigmentos fotossintéticos, eficiência do uso da água e indicadores microbiológicos e enzimáticos do solo. A irrigação plena resultou nos maiores ganhos morfológicos e de qualidade de mudas. Contudo, mesmo sob estresse, a combinação entre silício e *B. aryabhattai* proporcionou ganhos em altura, diâmetro do caule, índice de robustez e pigmentação foliar. A eficiência do uso da água foi maior em condição de estresse, sugerindo adaptação fisiológica. A atividade microbiana e enzimática do solo foi estimulada principalmente com *B. aryabhattai*, com destaque para o aumento da respiração basal, do carbono da biomassa microbiana e do quociente metabólico. O acúmulo de silício ocorreu majoritariamente nas raízes, sendo maior nos tratamentos com aplicação do elemento. Conclui-se que a associação entre *B. aryabhattai* e silício é uma estratégia promissora para a produção de mudas mais tolerantes à seca.

Palavras-chave: rizosfera; qualidade de mudas; fisiologia vegetal; atividade microbiana do solo; leguminosa nativa.

ABSTRACT

Mimosa caesalpiniiifolia Benth. (commonly known as sabiá) is a native leguminous tree used in agroforestry systems, the recovery of degraded areas, and wood production. Despite its rustic nature, its seedlings are sensitive to water deficit during the initial growth stage, which compromises performance, especially in semiarid regions. Sustainable strategies, such as the use of plant growth-promoting microorganisms and beneficial elements like silicon (Si), have been studied to enhance drought tolerance. *Bacillus aryabhattai* stands out for its ability to solubilize phosphorus, produce phytohormones, and stimulate microbial activity. Silicon, in turn, helps mitigate abiotic stresses by strengthening plant structures and activating antioxidant mechanisms. This study evaluated the effects of inoculation with *B. aryabhattai* and silicon application on growth, plant physiology, and soil microbial activity in sabiá seedlings under water stress conditions, using different irrigation levels (50% and 100% of field capacity). The experiment was conducted in a greenhouse using a completely randomized factorial design (2×4), considering: (i) treatments (control, *B. aryabhattai*, silicon, and *B. aryabhattai* + silicon) and (ii) irrigation levels (50% and 100%), with four replicates. Morphological variables, quality indices, photosynthetic pigments, water use efficiency, and microbiological and enzymatic indicators of the soil were evaluated. Full irrigation resulted in the greatest morphological and seedling quality gains. However, even under stress, the combination of silicon and *B. aryabhattai* promoted gains in plant height, stem diameter, robustness index, and leaf pigmentation. Water use efficiency was higher under stress conditions, suggesting physiological adaptation. Microbial and enzymatic soil activity was mainly stimulated by *B. aryabhattai*, with notable increases in basal respiration, microbial biomass carbon, and the metabolic quotient. Silicon accumulation occurred predominantly in the roots, being higher in treatments where the element was applied. It is concluded that the combination of *B. aryabhattai* and silicon is a promising strategy for producing seedlings more tolerant to drought.

Keywords: rhizosphere; seedling quality; plant physiology; soil microbial activity; native legume.

LISTA DE FIGURAS E TABELAS

Figura 1 – Locais identificados de ocorrência natural de sabiá (<i>Mimosa caesalpiniiifolia</i>), no Brasil	19
Tabela 1 – Caracterização química e física do solo	27
Figura 2 – Crescimento das mudas de <i>Mimosa caesalpiniiifolia</i> Benth	34
Figura 3 – Parâmetros de crescimento das mudas de <i>M. caesalpiniiifolia</i> Benth. submetidas a diferentes tratamentos e níveis de lâmina de água (50% e 100%). Massa seca da parte aérea (A), massa seca da raiz (B), altura (C), diâmetro do caule (D), número de folhas (E) e comprimento da raiz (F)	35
Figura 4 – Índice de robustez (A) e índice de qualidade de Dickson (B) em mudas de <i>Mimosa caesalpiniiifolia</i> Benth. submetidas a diferentes tratamentos e lâminas de água	37
Figura 5 – Pigmentos fotossintéticos (A, B, C e D) e eficiência do uso da água em mudas de <i>Mimosa caesalpiniiifolia</i> Benth. submetidas a diferentes tratamentos e lâminas de água	39
Figura 6 – Respiração basal do solo (RBS) (A), carbono da biomassa microbiana (CBM) (B) e quociente metabólico (qCO_2) em mudas de <i>Mimosa caesalpiniiifolia</i> Benth. submetidas a diferentes tratamentos e lâminas de água	41
Figura 7 – Determinação da atividade das enzimas Arilsulfatase (A), B-Glicosidase (B), Fosfatase ácida (C), Fosfatase alcalina (D) e Urease (E) em mudas de <i>Mimosa caesalpiniiifolia</i> Benth. submetidas a diferentes tratamentos e lâminas de água	43
Figura 8 – Quantificação do silício na parte aérea (A), raiz (B) e no solo (C), pH da solução do solo (D) em mudas de <i>Mimosa caesalpiniiifolia</i> Benth. submetidas a diferentes tratamentos e lâminas de água	45

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	16
2.1	Objetivo geral	16
2.2	Objetivo específicos	16
3	HIPÓTESE	17
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
4.1	Sabiá	18
4.2	Estresse hídrico em plantas	20
4.3	Micro-organismos promotores de crescimento vegetal	21
4.3.1	<i>Gênero Bacillus</i>	22
4.3.1.1	<i>Características gerais e importância agrícola</i>	<i>22</i>
4.3.1.2	<i>Potencial do Bacillus aryabhattai na promoção de crescimento e tolerância ao estresse</i>	<i>23</i>
4.4	Silício	24
5	MATERIAL E MÉTODOS	27
5.1	Delineamento experimental	27
5.2	Local de estudo e características do solo	27
5.3	Condução do experimento	28
5.4	Determinações analíticas	29
5.4.1	<i>Parâmetros de crescimento</i>	29
5.4.2	<i>Parâmetros fisiológicos</i>	29
5.4.2.1	<i>Eficiência do uso da água</i>	<i>29</i>
5.4.2.2	<i>Teor de clorofila a, b, total e carotenóides</i>	<i>29</i>
5.4.3	<i>Atividade microbiana</i>	30
5.4.3.1	<i>Respiração basal do solo</i>	<i>30</i>
5.4.3.2	<i>Carbono da Biomassa Microbiana</i>	<i>31</i>
5.4.3.3	<i>Quociente metabólico</i>	<i>31</i>
5.4.4	<i>Atividade enzimática do solo</i>	31
5.4.5	<i>Quantificação de silício e pH</i>	32
5.4.5.1	<i>Silício na parte aérea e raiz</i>	<i>32</i>
5.4.5.2	<i>Silício no solo</i>	<i>33</i>

5.4.5.3	<i>pH do solo</i>	33
5.5	Análise estatística	33
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
6.1	Crescimento	34
6.2	Qualidade das mudas	36
6.3	Parâmetros fisiológicos	38
6.4	Atividade microbiana	40
6.5	Atividade enzimática do solo	42
6.6	Silício e pH	44
7	CONCLUSÕES	47
	REFERÊNCIAS	48

1 INTRODUÇÃO

A *Mimosa caesalpiniiifolia* Benth., conhecida como sabiá, é uma leguminosa nativa do Brasil, de uso múltiplo e têm grande importância para a recuperação de áreas degradadas, sistemas agroflorestais, produção de madeira, paisagismo e forragem. No entanto, sua fase inicial de crescimento é sensível à escassez hídrica, o que pode comprometer sua sobrevivência e o sucesso no campo.

A intensificação das mudanças climáticas tem provocado irregularidades nos regimes hídricos, constituindo um dos principais entraves ao desenvolvimento agrícola, sobretudo em regiões tropicais e semiáridas, onde a irregularidade das chuvas afeta diretamente o estabelecimento de culturas e espécies florestais. Esse fator de estresse abiótico interfere em diversos processos fisiológicos e morfoanatômicos das plantas, podendo reduzir significativamente a produção de biomassa, a absorção de nutrientes e o desenvolvimento radicular (Taiz et al., 2017). Assim, é necessário buscar tecnologias que atenuem os efeitos desse estresse abiótico.

Nesse cenário, estratégias que aumentem a resiliência das plantas ao déficit hídrico tornam-se essenciais, especialmente em ambientes semiáridos. O uso de micro-organismos promotores de crescimento vegetal, como *Bacillus aryabhattai*, tem se mostrado promissores por conferir diversos benefícios às plantas hospedeiras. Podendo atuar diretamente no desenvolvimento das plantas por meio da sua interação com a mesma que pode ocorrer de diversas formas, como a produção de auxina que estimula o desenvolvimento radicular, a formação de biofilme e produção de exopolissacarídeos que protegem e hidratam as raízes, ajuda na retenção de água por meio do melhor controle do fechamento dos estômatos e pode produzir enzimas antioxidantes. Quando essas bactérias se estabelecem na rizosfera de plantas submetidas a estresse hídrico, passam a produzir compostos que contribuem para a retenção de água pelas raízes. De acordo com Kavamura et al. (2013), estirpes de *Bacillus* são capazes de induzir tolerância ao estresse hídrico por meio da produção de fitohormônios, aumento da absorção de nutrientes e ativação de mecanismos antioxidantes. Além disso, Kavamura et al. (2019) destacam que esses microrganismos também promovem alterações na rizosfera, favorecendo o equilíbrio da microbiota do solo e contribuindo para o crescimento vegetal em condições adversas.

Aliado a isso, o silício (Si) tem sido amplamente estudado por seus efeitos benéficos na resistência das plantas ao déficit hídrico, atua como uma barreira física, reforçando a estrutura dos tecidos vegetais, e conseqüentemente, reduzindo a perda de água, no reforço estrutural dos tecidos vegetais e na ativação de mecanismos antioxidantes que minimizam os danos causados

pelo estresse hídrico (Ma; Yamaji, 2006; Gunes et al., 2007). A interação entre silício e micro-organismos do solo tem mostrado efeitos sinérgicos, promovendo melhorias no crescimento vegetal, na saúde do solo e na resistência das plantas a fatores abióticos (Yuan et al., 2022). A combinação dessas duas estratégias pode potencializar o desenvolvimento de mudas mais vigorosas, mesmo sob condições de baixa disponibilidade hídrica. Em condições de estresse térmico, a combinação de Si com *Rhizobium* sp. e *Gluconacetobacter diazotrophicus* resultou em maior acúmulo de Si nas plantas, melhor crescimento, maior teor de clorofila e redução do vazamento de eletrólitos. Complementando essa evidência, Tang et al. (2025) observaram que a aplicação de silício contribuiu para a diversificação das comunidades bacterianas do solo, aumento da biomassa microbiana e redução da presença de fungos patogênicos, especialmente em solos contaminados, auxiliando no equilíbrio dos ciclos biogeoquímicos e na mitigação de deficiências nutricionais.

Contudo, há ainda uma lacuna de estudos específicos sobre a interação entre *Bacillus aryabhatai*, silício e espécies florestais nativas como a sabiá, especialmente sob diferentes lâminas de irrigação. Investigar esses efeitos é essencial para embasar o uso dessas tecnologias de forma integrada, contribuindo com práticas sustentáveis de produção de mudas e com o avanço do conhecimento técnico-científico sobre o manejo eficiente de recursos hídricos e biológicos na agricultura e na silvicultura.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar os efeitos da inoculação com *Bacillus aryabhattai* e da aplicação de silício sobre o crescimento, a fisiologia vegetal e a atividade microbiana do solo em mudas de sabiá (*Mimosa caesalpiniiifolia*) submetidas a condições de estresse hídrico

2.2 Objetivos específicos

- I. Avaliar o efeito de *Bacillus aryabhattai* e do silício no crescimento de mudas de sabiá sob estresse hídrico.
- II. Analisar a interação entre *B. aryabhattai* e silício no desenvolvimento das mudas.
- III. Mensurar variáveis morfológicas, fisiológicas e microbiológicas nos diferentes tratamentos.
- IV. Identificar combinações de tratamento que aumentem a tolerância ao déficit hídrico.

3 HIPÓTESE

Hipótese 1: A inoculação com *Bacillus aryabhattai* favorece o crescimento de mudas de sabiá sob déficit hídrico, em comparação às não inoculadas.

Hipótese 2: A aplicação de silício atenua os efeitos negativos do estresse hídrico, mantendo o funcionamento fisiológico das mudas de sabiá.

Hipótese 3: A combinação entre *Bacillus aryabhattai* e silício potencializa o crescimento e a tolerância ao estresse hídrico, superando os efeitos dos tratamentos isolados ou da ausência de ambos.

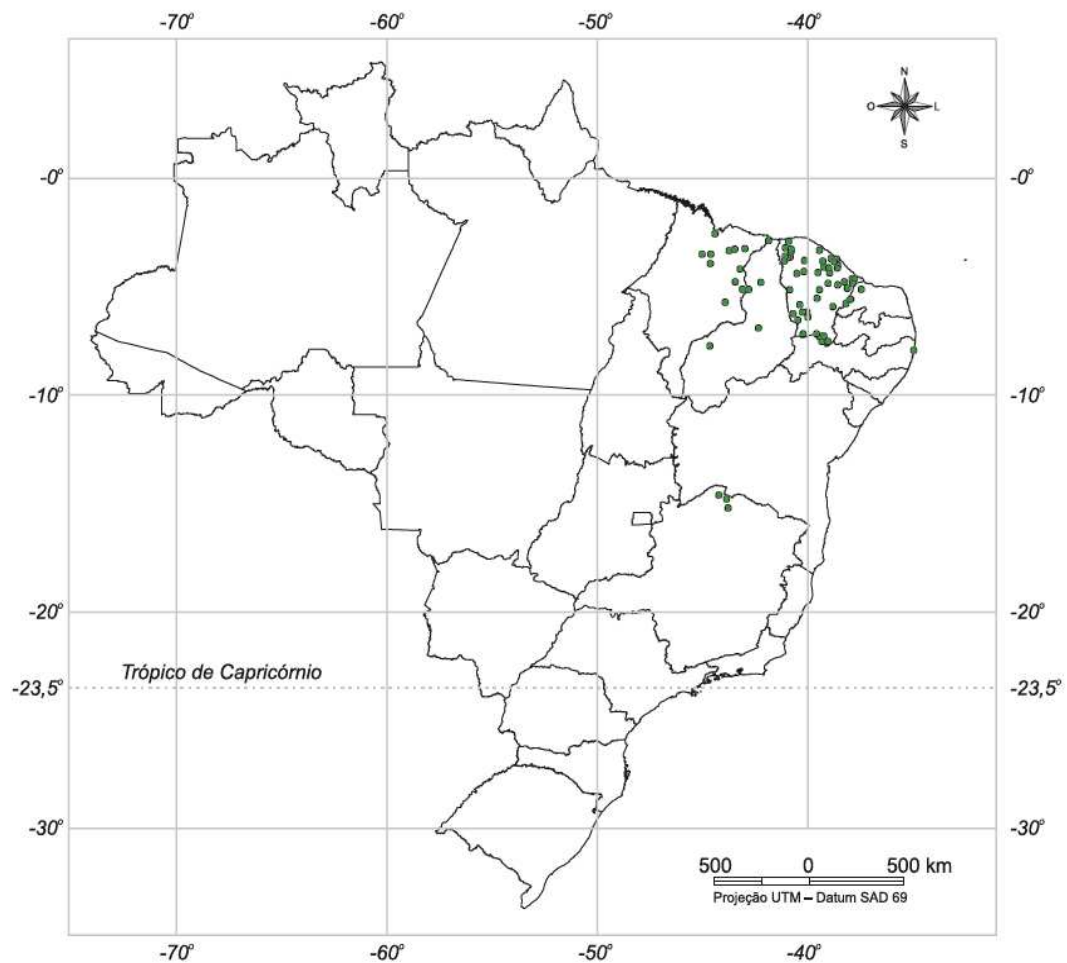
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Sabiá

Pertencente a ordem Fabales, família Fabaceae e subfamília Mimosoideae (Leguminosae: Mimosoideae), a espécie *Mimosa caesalpiniiifolia* Benth. (HOOKER, 1841) popularmente conhecida como Sabiá, no Ceará e em Pernambuco, angiquinho-sabiá, sabiá e sansão-do-campo em Minas Gerais e unha-de-gato no Piauí. Ela recebeu o nome sabiá curiosamente pela cor de seu caule ser parecido com a plumagem do pássaro de mesmo nome, do gênero *Turdus*, cujo é bastante conhecido na Caatinga, do Nordeste brasileiro (BRAGA, 1960; TIGRE, 1970).

Nativa da Caatinga o sabiá tem ocorrência em vários estados do Brasil e em diferentes altitudes fora de sua região de origem (figura 1), abrangendo assim os biomas da Caatinga e do Cerrado. É uma espécie heliófila, que não tolera baixas temperaturas, desenvolvem-se bem em terrenos profundos, solos de textura arenosa e semiúmidos, com precipitações variando de 600 a 1.000 milímetros anuais. No entanto, ocorre também em ambientes mais secos e com déficit hídrico, porém neste caso apresenta uma forma mais arbustiva e com tronco polifurcado. Possui a capacidade de se regerar por brotação, comportamento típico de espécies arbóreas do semiárido, as brotações são inclusive mais vigorosas e numerosas, em torno de 12 brotos. O sabiá é uma espécie cespitosa, que forma touceiras, com isso há também a capacidade de brotação nas raízes formarem grandes touceiras semicirculares, com somente uma semente.

Figura 1. Locais identificados de ocorrência natural de sabiá (*Mimosa caesalpinhiifolia*), no Brasil.



Fonte: Carvalho, 2006.

É uma árvore perenifólia, que pode atingir 10 metros de altura e 30 cm de DAP (diâmetro à altura do peito), na idade adulta. O tronco é dotado de acúleos em vários graus, podendo ser inerme, na medida que cresce eles desaparecem. Sua copa é espalhada, pouco densa e com muitas ramificações aculeadas. Apresenta casca com espessura com até 5 milímetros, de cor pardo-clara e pouco espinhosa. Suas folhas são compostas, bipinadas e alternas, as inflorescências é do tipo panículas de espigas medindo de 5 a 10 centímetros. Essa espécie é monóica, seu vetor de polinização é essencialmente a abelha africanizada *Apis mellifera* (NORONHA, 1997) e diversos insetos pequenos. As flores são brancas e pequenas, a floração é irregular dentre os diferentes estados que tem a ocorrência da espécie. Essa espécie começa seu processo reprodutivo precoce, por volta dos 2 anos de idade. Seus frutos é um craspédio articulado plano de 7 a 10 centímetros de comprimento por 10 a 13 milímetros de largura, sua semente varia de forma e mede de 5,1 a 5,9 milímetros de comprimento, 4,4 a 6,3

milímetros de largura e 1,3 a 1,8 milímetros de espessura, a dispersão deles é por gravidade. Seu sistema radicular apresenta-se adaptado às condições ambientais limitantes, sendo as raízes do tipo axial, com raízes secundárias longas, finas, bem ramificadas, na cor castanho-claro.

O sabiá é bastante cultivado por apresentar crescimento rápido, baixo valor econômico, alta capacidade de regeneração e resistência à seca, sendo capaz de ser explorado entre quatro e seis anos de idade para estacas, cercas e caibros, onde cada planta pode produzir até quatro caibros, gerando excelente fonte de lucro (LÊDO, 1980). Para aproveitamento da madeira, demora em torno de cinco anos, sendo ela compacta e apresenta superfície brilhante e lisa, de grande durabilidade mesmo quando exposta a umidade ou quando enterrada, com isso, ela é apropriada para usos externos. Sua madeira contém uma quantidade de tanino condensável que pode usá-lo como adesivo para colagem de madeira (PEREIRA; LELIS, 2000).

Apresenta ser uma espécie versátil, podendo ser usado como fonte de energia, na produção de carvão vegetal ou direto como fonte primária, na produção de lenha. Suas folhas verdes ou secas, assim como as vargens podem ser usadas para a alimentação animal, produtores rurais fabricam fenos de alto valor forrageiro para bovinos, caprinos e ovinos especialmente na época da seca, apresenta teor de 13,48% a 17,06% de proteína bruta (LIMA, 1996). É utilizado no paisagismo, por ter características ornamentais e forma entouceirada. Pode ser empregado como quebra-vento ou cerca-viva, é comum sua utilização para cercar sítios, fazendas, indústrias, loteamentos e áreas de mineração, apresentando a função de minimizar o impacto visual e ambiental, oferecendo proteção.

O sabiá é uma planta com características ecológicas importantes. É uma espécie melífera, suas flores de cores claras com uma produção grande quantidade de pólen e néctar, atraindo diversos pequenos insetos incluindo as abelhas, sendo assim de grande importância apícola (AIRES; FREITAS, 2001). Possui ainda a capacidade de realizar associações simbióticas com bactérias fixadoras de nitrogênio atmosférico, com isso apresenta em suas raízes muitos nódulos (FELICIANO, 1989) e com fungos micorrízicos arbusculares. Sendo estas características importantes para florestas em regeneração, principalmente em áreas de reflorestamento, contribuindo para a reintrodução de nutrientes essenciais ao solo e pelo alto valor adaptativo da espécie às condições ambientais adversas (NUNES et al., 2015).

4.2 Estresse hídrico em plantas

A água possui papel fundamental no organismo vegetal, estando relacionada em processos durante todo seu desenvolvimento, desde a germinação até a reprodução. Diante

disso, o déficit hídrico é um fator de estresse que causa danos nos processos fisiológicos e metabólicos das plantas, limitando a produtividade de muitas espécies cultivadas.

Algumas espécies vegetais ao longo do tempo desenvolveram mecanismos de resistência a seca, podendo reparar seu volume celular, adaptar seu metabolismo e crescerem de forma rápida para que seu ciclo seja completado antes que o estresse hídrico eleve para um nível elevado e cause danos (Verslues et al., 2006). Além mais, as plantas são classificadas em função a sua adaptação ao estresse hídrico, podendo ser: hidrófitas, higrófitas, mesófitas e xerófitas. As hidrófitas não toleram dessecação, higrófitas são plantas terrestres de ambientes úmidos e sombreados, mesófitas regulam a perda de água via abertura e fechamento dos estômatos e as xerófitas vivem em ambientes de escassez hídrica, onde sua morfologia, fisiologia e seus processos bioquímicos são adaptados (MARRENCO; LOPES, 2005).

Vale ressaltar a relação do solo com a água e as plantas, a estrutura do solo e suas propriedades influenciam na capacidade de infiltração, com isso se relaciona diretamente com a disponibilidade de água para as plantas. Depende ainda, do regime hídrico onde suas mudanças geram interferências no armazenamento de água nos solos (VALLE et al., 2000). Problemas ambientais, como no semiárido brasileiro, onde apresenta-se solos rasos e precipitações má distribuídas e concentradas em um curto período durante o ano, afetando a disponibilidade hídrica gerando uma limitação a sobrevivência das espécies vegetais.

4.3 Micro-organismos promotores de crescimento vegetal

Micro-organismos podem trazer benefícios as plantas, como os endofíticos, epifíticos e de vida livre, capazes de formarem relações simbióticas, associativas ou não, estimulando o crescimento vegetal de forma direta e indireta. A atuação desses micro-organismos pode ocorrer de diversas maneiras, ajudando na disponibilidade de nutrientes, como potássio, fósforo, nitrogênio e zinco e na síntese de hormônios vegetais, como a auxina, etileno e a giberelina, podendo atuar como agentes de biocontrole e aumentando a resistência da planta a estresse bióticos e abióticos (GLICK, 2012). Grande parte desses micro-organismos promotores de crescimento vegetal (MPCP) estão localizados na rizosfera, região do solo onde as raízes das plantas entram em contato, existindo assim grande atividade microbiana devido a secreção de exsudatos radiculares que estimulam a interação entre os micro-organismos e a planta (CARDOSO; NOGUEIRA, 2007).

Com isso, existe um grupo de bactérias que são chamadas de rizobactérias, onde a comunidade científica as nomeia como Rizobactérias Promotoras do Crescimento de Plantas (RPCPs) (SANTOS, 2018). Algumas dessas bactérias produzem estruturas, como os nódulos,

sendo eles especializados para a fixação de nitrogênio. Tendo como exemplo as espécies dos gêneros *Rhizobium*, *Bradyrhizobium*, *Sinorhizobium*, *Mesorhizobium* e *Allorhizobium*. Outros grupos de bactérias que se desenvolvem fora das células das plantas, não produzindo nódulos, porém elas produzem sinais ou substâncias específicas que promovem o crescimento vegetal, dentro desse grupo tem-se como exemplo os gêneros *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Serratia* e *Burkholderia*.

Dentre os micro-organismos benéficos as plantas, as bactérias como promotoras de crescimento vegetal desempenham um papel importante na melhoria das características físicas, químicas e biológicas dos solos, o que a torna um dos principais organismos desse grupo. Seus mecanismos podem estimular o desenvolvimento vegetal como a solubilização do fosfato, produção de fitotoxinas e indiretamente com a produção de sideróforos e exopolissacarídeos (Rezende *et al.*, 2021).

A crescente demanda por uma agricultura sustentável e menos prejudicial ao meio ambiente tem impulsionado o uso de micro-organismos benéficos. Entre eles, destacam-se as bactérias promotoras de crescimento, que contribuem para que as plantas enfrentem melhor a escassez de água. Elas favorecem o desenvolvimento do sistema radicular, permitindo que as raízes alcancem camadas mais profundas do solo, com maior formação de raízes secundárias e aumento na quantidade de tricomas.

4.3.2 Gênero *Bacillus*

4.3.2.1 Características gerais e importância agrícola

Estão entre as bactérias mais abundantes na rizosfera, sobrevive em variados nichos ecológicos, podem ser epifíticas e endofíticas, não patogênicas, apresentando uma diversidade de mecanismos que promovem desenvolvimento e resistência a fatores de estresse vegetal, são gram-positivas, com forma de bastão e formadoras de endósporos (esporos). Este gênero se caracteriza com grande atividade metabólica (FRANCO; LANDGRAF, 2002). As espécies de *Bacillus* quando presentes em solos de baixa fertilidade, aumentam absorção de nutrientes fosfatados (SAHARAN, 2011).

São importantes agentes de biocontrole, devido sua capacidade de produzir metabólitos secundários com atividade antimicrobiana, inibindo o desenvolvimento de fitopatógenos, além disso pode induzir a resistência sistêmica, protegendo a planta de nematoide (Adam, Heuer & Hallmann, 2014). Um exemplo, seria a produção de sideróforos, que são compostos orgânicos de baixo peso molecular que podem quelar ferro, um elemento essencial para o

desenvolvimento de micro-organismos, com isso, quando são produzidos prejudicam o crescimento de patógenos vegetais (GLICK, 2020).

Pesquisas indicam que as rizobactérias desempenham papel essencial em diversos processos fisiológicos relacionados à tolerância ao estresse abiótico, atuando de forma sinérgica na otimização das funções celulares envolvidas na biorremediação de ambientes adversos. Dentre esses processos, destaca-se a produção de solutos compatíveis moléculas orgânicas de baixo peso molecular, como a betaína que auxiliam na manutenção da integridade celular sob condições de estresse. Outro mecanismo relevante é a formação de biofilmes, estruturas organizadas sintetizadas pelas rizobactérias, compostas por agregados multicelulares que se aderem à superfície das raízes por meio da produção de matriz extracelular rica em polissacarídeos, proteínas e ácidos nucleicos, contribuindo para a proteção e a colonização da rizosfera (EMBRAPA, 2017).

4.3.2.2 Potencial do *Bacillus aryabhattai* na promoção de crescimento e tolerância ao estresse

O *Bacillus aryabhattai* é comumente encontrada na rizosfera do mandacaru (*Cereus jamacaru*), um cacto importante e conhecido da região do semiárido brasileiro. Essa bactéria apresenta características que ajudam as plantas otimizarem o uso da água, mitigando os efeitos de estresses abióticos e possibilitando assim maior produtividade. Podendo atuar diretamente no desenvolvimento das plantas por meio da sua interação com a mesma que pode ocorrer de diversas formas, como a produção de auxina que estimula o desenvolvimento radicular, a formação de biofilme e produção de exopolissacarídeos que protegem e hidratam as raízes, ajuda na retenção de água por meio do melhor controle do fechamento dos estômatos e pode produzir enzimas antioxidantes.

Quando essas bactérias se estabelecem na rizosfera de plantas submetidas a estresse hídrico, passam a produzir compostos que contribuem para a retenção de água pelas raízes. A investigação do potencial dessas bactérias, com ocorrência comum em espécies adaptadas ao clima semiárido, ainda representa um desafio, especialmente no que se refere ao seu desempenho sob condições de déficit hídrico. Diante disso, a questão da escassez de água continua exigindo atenção especial (EMBRAPA, 2019).

Diversas pesquisas têm demonstrado a eficácia dessa espécie na indução de tolerância ao estresse hídrico em diferentes espécies vegetais. No caso da cana-de-açúcar, May et al. (2019) relataram maior aproveitamento da água em mudas pré-brotadas submetidas à inoculação com *Bacillus aryabhattai*, presente na rizosfera. Kavamura et al. (2013) isolaram uma estirpe do gênero *Bacillus* associada a cactáceas da Caatinga e constataram sua capacidade

de favorecer o crescimento de milho sob escassez hídrica, promovendo um incremento de 28,2% na biomassa radicular em comparação ao controle. Estudos com feijão também evidenciaram resultados positivos, como relatado por Oliveira (2020), que verificou aumento no crescimento das plantas em decorrência da inoculação da bactéria na semente. Resultados semelhantes foram observados por Park et al. (2017), os quais constataram que uma estirpe de *B. aryabhattai* proporcionou melhorias significativas no desenvolvimento de soja e arroz, além de colonizar eficientemente o sistema radicular em até dois dias após a inoculação. Já Moraes (2018) analisou a coinoculação de *Bradyrhizobium japonicum* e *B. aryabhattai* em soja, observando mitigação dos efeitos do estresse hídrico, possivelmente associada à maior atividade da enzima peroxidase nas plantas submetidas à restrição hídrica.

4.4 Silício

O silício (Si) é um elemento benéfico, que atua nas plantas melhorando seu crescimento e desenvolvimento, principalmente em situações de estresse biótico e abiótico. Na legislação brasileira, pelo Ministério da Agricultura (MAPA) em 2004, o Si foi incluído na lista de fertilizantes como micronutriente, potencializando pesquisas e seu uso comercial.

Esse elemento ocupa 27,7% da crosta terrestre e é o segundo elemento mais abundante, encontrado na forma de óxidos na natureza (Dechen & Nachtigall, 2006, p. 127). Sua presença é maior em solos jovens, pois depende do grau de intemperismo do solo. Ocorre principalmente como SiO_2 e participa da formação de argilo-minerais no solo (MENEGALE; CASTRO; MANCUSO, 2015). Sua disponibilidade às plantas depende da textura, mineralogia e teor de argila do solo (CAMARGO, 2016a). É absorvido na forma de ácido monossilícico (H_4SiO_4) por transporte ativo ou passivo pelas raízes (RAVEN, 2001; KORNDÖRFER; SOUZA, 2018), sendo posteriormente transportado pelo xilema e acumulado como sílica amorfa nos tecidos vegetais (MOREIRA et al., 2010). Essa deposição, especialmente em folhas e caules, forma uma camada protetora que reduz a transpiração, melhora a resistência ao estresse hídrico, pragas e doenças, além de favorecer o aproveitamento da luz solar e a produtividade agrícola (MA; YAMAJI, 2006; LANA et al., 2003; PULZ et al., 2008; RIBEIRO et al., 2011).

Os efeitos benéficos do silício (Si) sobre a tolerância das plantas ao estresse abiótico são classificados em físicos e fisiológicos (CANTUÁRIO et al., 2014). Fisicamente, a deposição de Si na parede celular de folhas, caules e raízes forma uma barreira que reduz a perda de água e contribui para a estruturação da planta (KORNDÖRFER et al., 2002). Do ponto de vista fisiológico, o Si favorece a fotossíntese, reduz o ataque de pragas e patógenos, e induz a produção de compostos como fitoalexinas e lignina, que aumentam a tolerância à seca (POZZA

et al., 2004). Também ativa enzimas como quitinases, peroxidases e polifenoloxidasas (LIANG; SUN, 2005), além de atuar no sistema antioxidativo das plantas, ajudando a mitigar os danos causados por estresse térmico e hídrico, reduzindo a acumulação de espécies reativas de oxigênio (CRUSCIOL et al., 2009; GUNES et al., 2007). Em regiões áridas e semiáridas, o Si tem sido eficiente na atenuação dos efeitos da salinidade, fator limitante à produção agrícola, como demonstrado por AHMAD (1992) em trigo e por BRADBURY e AHMAD (1990) e MIRANDA (2002) em espécies como *Prosopis juliflora*, *Anacardium occidentale* e *Moringa oleifera*.

Diversos pesquisadores têm voltado sua atenção para os efeitos positivos do Si na mitigação de deficiências de micronutrientes, como ferro (Fe) e zinco (Zn) (Hernandez-Apaolaza, 2014). Gonzalo et al. (2013) observaram que o uso de Si contribuiu para reduzir os impactos do estresse causado pela deficiência de Fe em plantas de soja, retardando os sintomas de clorose. De maneira semelhante, Mehrabanjoubani et al. (2015) relataram que, em plantas de arroz, o Si favoreceu a translocação de Zn das raízes para a parte aérea da planta.

O silício (Si) tem demonstrado papel relevante na mitigação da toxicidade de elementos como o alumínio (Al) e o cádmio (Cd) em plantas. Estudos indicam que, sob determinadas condições, o Si pode interagir com o Al no interior das células vegetais, promovendo a complexação de íons metálicos, a ativação do sistema antioxidante e sua imobilização em compartimentos celulares, como vacúolos e citoplasma (Neuman; Nieden, 2001; Freitas et al., 2015). Além disso, há evidências de que o Si forma complexos com o Al fora da planta, atenuando seus efeitos tóxicos (Sousa Junior, 2019), especialmente em ambientes com pH próximo à neutralidade, onde ocorre a formação de hidroxialuminossilicatos (Hodson; Sangster, 1999). De forma semelhante, o Si atua na redução da toxicidade do Cd ao aumentar o pH do solo e permitir a complexação e retenção do metal, dificultando sua absorção pelas raízes (Sommer et al., 2006). Essa resistência é reforçada pela deposição de Cd na endoderme radicular, criando uma barreira física que impede sua translocação para a parte aérea da planta (Ma; Guo, 2014; Cunha; Nascimento, 2009).

A aplicação de silício (Si) ao solo tem mostrado impactos positivos na composição e funcionalidade da microbiota rizosférica, promovendo o crescimento de micro-organismos benéficos como bactérias promotoras de crescimento de plantas e solubilizadoras de fosfato. Segundo Yuan et al. (2022), a adição de sílica amorfa elevou significativamente a viabilidade de bactérias como *Bacillus megaterium*, *Pseudomonas fluorescens* e *Azotobacter vinelandii*. Em estudo conduzido por Alzahrani et al. (2021), foi observado que a aplicação conjunta de silício e PSB, como *Pseudomonas* sp. e *Bacillus simplex*, promoveu aumento na

disponibilidade de Si e fósforo na rizosfera, o que refletiu em um incremento expressivo na biomassa da parte aérea do trigo, chegando a ser até 3,5 vezes superior ao tratamento controle.

A associação entre silício e micro-organismos também tem sido eficaz na atenuação de estresses abióticos. De acordo com Ansari et al. (2023), em condições de estresse térmico em arroz, a combinação de Si com *Rhizobium* sp. e *Gluconacetobacter diazotrophicus* resultou em maior acúmulo de Si nas plantas, melhor crescimento, maior teor de clorofila e redução do vazamento de eletrólitos. Complementando essa evidência, Tang et al. (2025) observaram que a aplicação de silício contribuiu para a diversificação das comunidades bacterianas do solo, aumento da biomassa microbiana e redução da presença de fungos patogênicos, especialmente em solos contaminados, auxiliando no equilíbrio dos ciclos biogeoquímicos e na mitigação de deficiências nutricionais.

Outras pesquisas evidenciaram que a aplicação de silício tem efeitos positivos na resistência das plantas a patógenos e insetos-praga, atuando em níveis físico, químico e molecular. A deposição de silício na parede celular forma uma barreira física que dificulta a penetração de micro-organismos e aumenta a rigidez dos tecidos epidérmicos (Silva et al., 2012; Rodrigues et al., 2003). Essa proteção pode ocorrer tanto antes quanto após a infecção, com formação de papilas nos locais de entrada dos patógenos (Pereira et al., 2009). Estudos em monocotiledôneas e dicotiledôneas sugerem que o silício favorece a polimerização de ácido salicílico e fortalece a estrutura da epiderme por meio da formação de camadas de sílica amorfa (Yoshida, 1965; Kim et al., 2001). Além disso, sua aplicação aumenta a concentração de compostos fenólicos envolvidos na defesa das plantas (Rodrigues et al., 2004). No controle de insetos-praga, o silício reduz ataques ao dificultar a digestão dos tecidos consumidos, inibir o crescimento e diminuir a taxa reprodutiva dos insetos (Portela & Silva, 2018; Alcantra et al., 2010).

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Delineamento experimental

O delineamento experimental implementado foi o inteiramente casualizado, em arranjo fatorial duplo, considerando: (i) dois níveis de lâmina de água (50% e 100%) e (ii) quatro tratamentos (controle, *B. Aryabhatai*, Si, *B. Aryabhatai*+Si), com quatro repetições, constituindo 32 unidades experimentais.

5.2 Local de estudo e caracterização do solo

O estudo foi conduzido em casa de vegetação do Departamento de Ciências do Solo e o solo utilizado para o cultivo foi coletado na área que pertence ao Núcleo de Ensino e Pesquisa em Agricultura Urbana, ambos locais pertencentes a Universidade Federal do Ceará (UFC), no Campus do Pici, Fortaleza-CE. O solo foi coletado na profundidade de 0 a 20 cm, após a coleta foi submetido a análise química e física, realizada pelo laboratório da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (tabela 1), conforme o resultado foi corrigido o pH e os teores de cálcio e magnésio, com calcário (calcário dolomítico com 95% de poder relativo de neutralização total, PRNT). A dose de calcário foi definida com base no critério da necessidade de calagem (NC), calculada a partir da saturação por bases (V%) observada na análise química do solo. Considerando que o solo apresentava um V% de 41% e que, para o cultivo da *Mimosa caesalpinhiifolia* em condições de casa de vegetação, buscou-se elevar esse valor para 50%.

Tabela 1. Caracterização química e física do solo.

pH	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	H ⁺ +Al	Al ³⁺	SB	CTC	V
H ₂ O	cmolc/kg								(%)
4,5	0,18	2,40	0,4	0,06	4,46	0,50	3,04	7,44	41,0
MO	C	N	C/N		Argila	Areia	Silte		
g/kg		g/kg		g/kg					
21,39	12,49	1,36	9		37,0	868,0	95,0		

Fonte: Laboratório de solos e água (Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos). pH (Potencial Hidrogeniônico): medido na relação solo:água de 1:2,5 pelo método de Walkley-Black; Ca²⁺, Mg²⁺ e Al³⁺: extraídos com KCl 1 mol/L; H⁺+Al (Acidez Potencial): determinada com (CH₃COO)₂Ca.H₂O 0,5 mol/L a pH 7; CTC (Capacidade de Troca de Cátions): calculada pela soma de (Ca²⁺ + Mg²⁺ + K⁺ + H⁺ + Al³⁺); SB (Soma de Bases): calculada pela soma de (Ca²⁺ + Mg²⁺ + K⁺ + Na⁺); V (Índice de Saturação por Bases): calculado como (SB/CTC) x 100; argila, areia e silte: determinados pelo método da pipeta.

5.3 Condução do experimento

Para trabalhar com duas lâminas de água, 50 e 100%, foi necessário a análise da capacidade de campo e do ponto de murcha permanente do referido solo, ambas as análises foram realizadas no Laboratório de Física do Solo – UFC. Para determinação da capacidade de campo, utilizou-se mesa de tensão para estabelecer o equilíbrio entre a umidade da amostra e a tensão de 10 kPa e o ponto de murcha permanente, utilizou-se a câmara de Richards também para estabelecer o equilíbrio entre a umidade da amostra, porém a uma tensão de 15 kPa, ambos foram feitos em triplicata (Klute, 1986). Após essas análises, realizou-se os seguintes cálculos para a obtenção do volume de água necessário na irrigação:

$$IRN = \frac{Cc - Pm}{10} Ds \times Z \text{ (Equação 1)}$$

Onde IRN é a irrigação real necessária (mm), Cc é a capacidade de campo (cm³ água/ cm³ solo), Pm é o ponto de murcha permanente (cm³ água/ cm³ solo), Ds é a densidade do solo (g/cm³) e Z é a profundidade efetiva do sistema radicular (cm).

$$VI = \frac{(Vp - Vd)}{(1 - L)} \text{ (Equação 2)}$$

Em que VI é o volume de água a ser aplicado na irrigação (ml), Vp é o volume de água aplicado na irrigação anterior (ml), Vd é o volume de água drenada (ml) e L é a fração de lixiviação de 0,15. Com isso, as lâminas de água do estresse hídrico foram estabelecidas conforme o princípio do lisímetro de drenagem (Bernardo et al., 2019), de modo a manter o solo nos tratamentos de 100% na capacidade de campo e nos de 50% na metade de sua capacidade, todos tiveram as umidades específicas mantidas durante todo o período da conduta experimental.

O ensaio para a obtenção das mudas de sabiá foi realizado em vasos de 3 kg de solo; os quais foram revestidos com sacos plásticos. Após 15 dias da aplicação do calcário, adicionou-se 200 mg de Si, na forma de Silicato de Sódio, colocado nos vasos dos tratamentos que continham silício e incubou durante 7 dias. O inóculo microbiano utilizado foi o *Bacillus Aryabhatai*, componente do bioinsumo da Embrapa em parceria com a empresa NOOA, AURAS®, a única tecnologia da espécie com a cepa CMAA 1363 e 1x10⁸ UFC/mL de concentração. Foi utilizado 4ml/kg do inoculante nas sementes antes da semeadura, as quais foram lavadas com álcool 70% para a quebra da tensão superficial, em seguida foram desinfetadas com hipoclorito 2:1 durante 10 minutos e posteriormente, lavadas com água destilada. As sementes já estavam com dormência quebrada por escarificação mecânica, própria da empresa Biosementes. Foi semeado 4 sementes por vaso e após 7 dias a emergência das plântulas, realizou-se o desbaste deixando apenas uma planta. A reinoculação foi realizada após 15 dias a inoculação, diretamente no vaso, ao lado do colo da planta aplicou-se um milímetro

do Auras. As mudas de sabiá foram mantidas em casa de vegetação até 90 dias depois da emergência das plantas, o experimento no total abrangeu os meses de julho a novembro de 2024.

5.4 Determinações Analíticas

5.4.1 Parâmetros de crescimento

Após os 90 dias a emergência, as plantas foram coletadas, separadas e armazenadas em sacos de papel divididas em folhas, caule e raiz. No momento da coleta foram mensurados a altura da parte aérea, número de folhas, diâmetro do caule e comprimento da raiz. A altura das mudas foi considerada sendo a distância entre o nível do solo até a inserção do broto terminal da haste principal, utilizando-se régua (cm). O diâmetro do caule foi medido a 5 cm acima do colo, com a utilização do paquímetro digital com a escala de leitura em milímetro. O comprimento da raiz foi medido com o auxílio da régua em centímetros. Para obtenção da massa seca da parte aérea (MSPA) e raiz (MSR), as partes da planta em saco de papel foram postas para secar em estufa à 60°C, por um período constante até sua completa desidratação, depois disso, o material vegetal foi pesado.

5.4.2 Qualidade das mudas

Os índices de relacionados ao vigor das mudas, Qualidade de Dickson (Dickson et al. 1960) e Robustez (Melo et al. 2018), foram calculados com base nos valores obtidos dos dados morfológicos coletados. Aplicou-se as seguintes equações:

$$\text{Índice de qualidade de Dickson} = \frac{\text{MASSA SECA TOTAL}}{\left(\frac{DC}{A}\right) + \left(\frac{MSR}{MSPA}\right)} \quad (\text{Equação 1})$$

$$\text{Índice de robustez} = \frac{H}{DP} \quad (\text{Equação 2}),$$

onde, DC representa o diâmetro do caule, A a altura da planta ao nível do solo, MSPA é a massa seca da parte área e MSR massa seca da raiz.

5.4.3 Parâmetros fisiológicos

5.4.3.1 Eficiência do uso da água

Mede a quantidade de carbono assimilado pela planta em relação à quantidade de água transpirada, refletindo assim a eficiência hídrica da planta em $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$. Foi avaliado aos 85 dias depois da emergência (DAS) no período das 9h00 às 11h00, com as folhas totalmente expandidas, utilizando um analisador de gás infravermelho (Li-6400 XT; LiCor, Lincoln, EUA) em um sistema aberto com ar fluxo de 300 mL min.

5.4.3.2 Teor de clorofila *a*, *b*, total e carotenóides

Foram determinados através do método descrito por Wellburn (1994). Onde três discos medindo 1,0 cm de diâmetro foram retirados do primeiro par de folhas completamente expandidas e colocados em tubos de ensaio contendo 5 mL de uma solução de dimetilsulfóxido (DMSO) saturada com CaCO_3 , os quais foram previamente revestidos com papel alumínio e permaneceram tampados durante toda a análise. Em seguida, as amostras foram incubadas a 65 °C, em banho-maria, por 30 min. Decorrido esse tempo, e após terem atingido a temperatura ambiente, os discos foliares foram reservados e o extrato de pigmentos foi utilizado para a determinação da absorbância a 665, 649 e 480 nm. Por fim, os discos foliares foram lavados, para a retirada do excesso de DMSO, e secos a 60 °C, por 48 h, em estufa, para a obtenção de sua massa seca, expresso em mg g^{-1} MS. Os teores de clorofila *a* (C_a), clorofila *b* (C_b), clorofila total (C_t) e carotenoides foram calculados com base nas seguintes equações:

$$C_a = (12,47 \times A_{665}) - (3,62 \times A_{649}) \text{ (Equação 1);}$$

$$C_b = (25,06 \times A_{649}) - (6,5 \times A_{665}) \text{ (Equação 2);}$$

$$C_t = (7,15 \times A_{665}) + (18,71 \times A_{649}) \text{ (Equação 3);}$$

$$\text{Carotenoides} = \frac{(1000 \times A_{480} - 1,29 \times C_a - 53,78 \times C_b)}{220} \text{ (Equação 4),}$$

em que *A* representa a absorbância em um respectivo comprimento de onda. O resultado foi expresso em $\mu\text{g mL}^{-1}$.

5.4.4 Atividade microbiana

5.4.4.1 Respiração basal do solo

Após a colheita do material vegetal, as amostras de solo foram previamente tamisadas em malha de 2 mm, acondicionadas em sacos plásticos e armazenadas sob refrigeração a 4 °C até a realização das análises. A determinação da respiração basal do solo foi efetuada por meio do método de respiração induzida por substrato, seguindo protocolos específicos para avaliação da atividade microbiana do solo. A determinação da respiração basal do solo foi conforme o método da respiração induzida por substrato (Anderson; Domsch, 1978) adaptado, onde 100 g de solo úmido foi colocado em frascos de incubação, em cada frasco adicionou-se recipientes com água destilada e 20 mL de NaOH 0,5N. Após fechado incubou-se por 24 horas, depois desse período, pipetou 10 mL da solução de NaOH e adicionou-se 1mL de BaCl_2 50% e 2 gotas do indicador fenolftaleína para a titulação com HCl 0,5N, o valor da titulação foi anotado. Repetiu-se esse ciclo por 7 dias, onde todos os dias após as titulações eram adicionados aos

frascos a solução de NaOH nova. Esse método mede o volume de CO₂ liberado ao longo de um período, o qual é registrado a cada 24h.

5.4.4.2 *Carbono da biomassa microbiana*

Para a determinação do CBM foi utilizado o método de fumigação-extração (VANCE et al., 1987), no qual 20g de solo úmido foi disposto em frascos de vidro de 100 mL, para as amostras que seriam fumigadas e não fumigadas. Após a pesagem foi adicionado 1mL de clorofórmio isento de etanol em todos os frascos destinados a fumigação e logo em seguida foram fechados, vedados e armazenados em local sem luminosidade por 24 horas. No dia seguinte deixou-se evaporar todo o clorofórmio. Na extração, transferiu-se o solo dos frascos fumigados e não fumigados para erlenmeyers e adicionou-se 80mL de solução 0,5M de sulfato de potássio, posteriormente agitou-se por 30 minutos a 200 rpm, depois de decantado, o sobrenadante foi filtrado. Foi utilizado 8 mL do extrato, adicionando 2 mL de dicromato de potássio 0,0667M e 15 mL da mistura ácido sulfúrico/fosfórico foi acondicionado para tubo digestor e efetuado a digestão por 30 minutos a 100°C em bloco digestor. Após esfriado foi transferido para erlenmeyer, lavou-se o tubo com água destilada até o volume de 50mL, adicionou-se 7 gotas de Ferroin e titulou-se com sulfato ferroso amoniacal. O cálculo para a obtenção do CBM é feito pela diferença entre as amostras fumigadas e não fumigadas, com a utilização do fator de conversão de 0,33.

5.4.4.3 *Quociente metabólico*

Foi calculado pela razão entre a respiração basal do solo (RBS) e o carbono da biomassa microbiana (CBM).

$$q\text{Co}_2 = \frac{RBS}{CBM} \text{ (Equação 1).}$$

5.4.5 *Atividade enzimática do solo*

Todas as análises da atividade enzimática do solo foram utilizadas 1 g de solo úmido, exceto a Urease os protocolos são similares mudando, contudo, as soluções dependendo da enzima a ser quantificada. Para as determinações das atividades da Arilsulfatase (Tabatabai & Bremner 1970), β -glicosidase, fosfatase ácida e alcalina (Ivani & Tabatabai, 1977), o solo pesado foi acondicionado em tubos do tipo *Falcon* adicionando 4 mL de solução tampão e 1 mL de p-nitrofenil-b-D-glicosídeo 0,05M (PNG), com exceção do controle, os tubos foram

levados para agitar no vórtex e depois posto para a incubação por 1 hora a 37°C em banho maria. Após essa etapa, acrescentou-se nas amostras 1 mL de Cloreto de Cálcio (0,5 M) e 4 mL de Tris (hidroximetil) aminometano (0,1 M pH 12) para b-glicosidase e 4 mL de Hidróxido de Sódio para arilsulfatase e as fosfatases ácida e alcalina, no controle adiciona-se o PNG para β -glicosidase, PNS para Arilsulfatase e PNP para as fosfatases. Depois os tubos são levados para homogeneização no vórtex, filtrados em papel de filtro Whatman nº 2 e do extrato filtrado é realizado a leitura a 410 nanômetros para β -glicosidase e arilsulfatase e a 420 nanômetros para as fosfatases ácida e alcalina, em espectrofotômetro digital da marca KASVI (com faixa visível de 325 a 1020 nm de feixe único a 4 slots).

Na determinação da urease (Kandeler e Gerber, 1988), 5g de solo é acondicionado a tubo do tipo *Falcon* e nessas amostras é adicionado 2,5 mL de solução de ureia mais 20 mL e solução tampão Borato, porém no controle adiciona-se somente 2,5 mL de água destilada juntamente com o tampão. Após acrescentados as soluções os tubos são levados para agitar no vórtex e incubados a 37°C por 2 horas em banho maria, depois é adicionado 30 mL da solução de KCl acidificado e nos controles é adicionado os 2,5 mL de solução de ureia também, as amostras são agitadas na mesa agitadora por 30 segundos e filtradas após. 1mL do sobrenadante é adicionado a 9 mL de água destilada, 5 mL da solução MIX (salicilato de sódio 1,06 M, hidróxido de sódio 0,3 M e água destilada) e 2 mL da solução de dicloroisocianurato de sódio 0,1%. Posteriormente é realizado a homogeneização manual e postas em repouso por 1 hora, após esse período é feito a leitura a 690 nanômetros no espectrofotômetro.

5.4.6 Quantificação de silício e pH

5.4.6.1 Silício na parte aérea e raiz

A quantificação de silício no tecido vegetal foi realizada com base no método proposto por Elliot e Snyder (1991). Para isso, 0,1 g do material vegetal seco e triturado foi transferido para tubos Falcon de plástico, aos quais se adicionaram 2 mL de peróxido de hidrogênio a 30% e, em seguida, 3 mL de hidróxido de sódio a 50%. Após cada adição, os tubos foram agitados por 30 segundos. Com os tubos destampados, as amostras foram submetidas a banho-maria a 85 °C por 1 hora. Posteriormente, realizaram-se nova agitação e digestão em autoclave, à temperatura de 123 °C e pressão de 1,5 atm, durante 1 hora. Após o resfriamento, foram adicionados 45 mL de água destilada às amostras, seguidos de nova agitação e filtração em frascos plásticos. Para a determinação espectrofotométrica, alíquotas de 0,5 mL do extrato foram misturadas com 9,5 mL de água destilada, 0,5 mL de ácido clorídrico a 50% e 1 mL de

solução de molibdato de amônio (preparada na proporção 1:5 m/v). Após 10 minutos, adicionou-se 1 mL de ácido oxálico 0,6 M, realizando-se a leitura imediatamente após a reação. A absorbância foi medida em espectrofotômetro digital da marca KASVI (faixa visível de 325 a 1020 nm, feixe único, 4 slots), no comprimento de onda de 410 nm.

5.4.6.2 *Silício no solo*

A determinação de silício disponível no solo foi realizada com base no método proposto por Korndörfer et al. (1999). Foram utilizados 10 g de solo seco e peneirado (malha de 2 mm), acondicionados em Erlenmeyer de plástico, aos quais se adicionaram 100 mL de solução de ácido acético 0,5 mol L⁻¹. A mistura foi agitada em mesa agitadora por 1 hora e, após repouso de 30 minutos, o extrato foi filtrado e transferido para frascos plásticos. Para a análise espectrofotométrica, 10 mL do extrato foram reagidos com 1 mL da solução sulfo-molíbdica a 7,5%. Decorridos 10 minutos, adicionaram-se 2 mL da solução de ácido tartárico a 20%, e, após 5 minutos, 10 mL de solução de ácido ascórbico a 0,3%. A mistura foi mantida em repouso por 1 hora antes da leitura em espectrofotômetro digital da marca Thermo Scientific (modelo Genesys 10S UV–VIS), no comprimento de onda de 660 nm. As concentrações de silício foram calculadas com base no volume do extrato, na massa da amostra e nos valores obtidos pela curva de calibração previamente construída no espectrofotômetro.

5.4.6.3 *pH do solo*

Determinado seguindo a metodologia descrita por Teixeira et al. (2017). Onde 10g de solo seco e tamisado foi acondicionado em copo plástico e adicionou-se 25 mL de água destilada, posteriormente agitou-se com bastão de vidro por cerca de 60 segundos e deixou-se em repouso por 1 hora. Após agitou-se as amostras novamente com o bastão e mergulhou-se no eletrodo a suspensão homogeneizada e realizou-se a leitura do pH.

5.7 **Análise estatística**

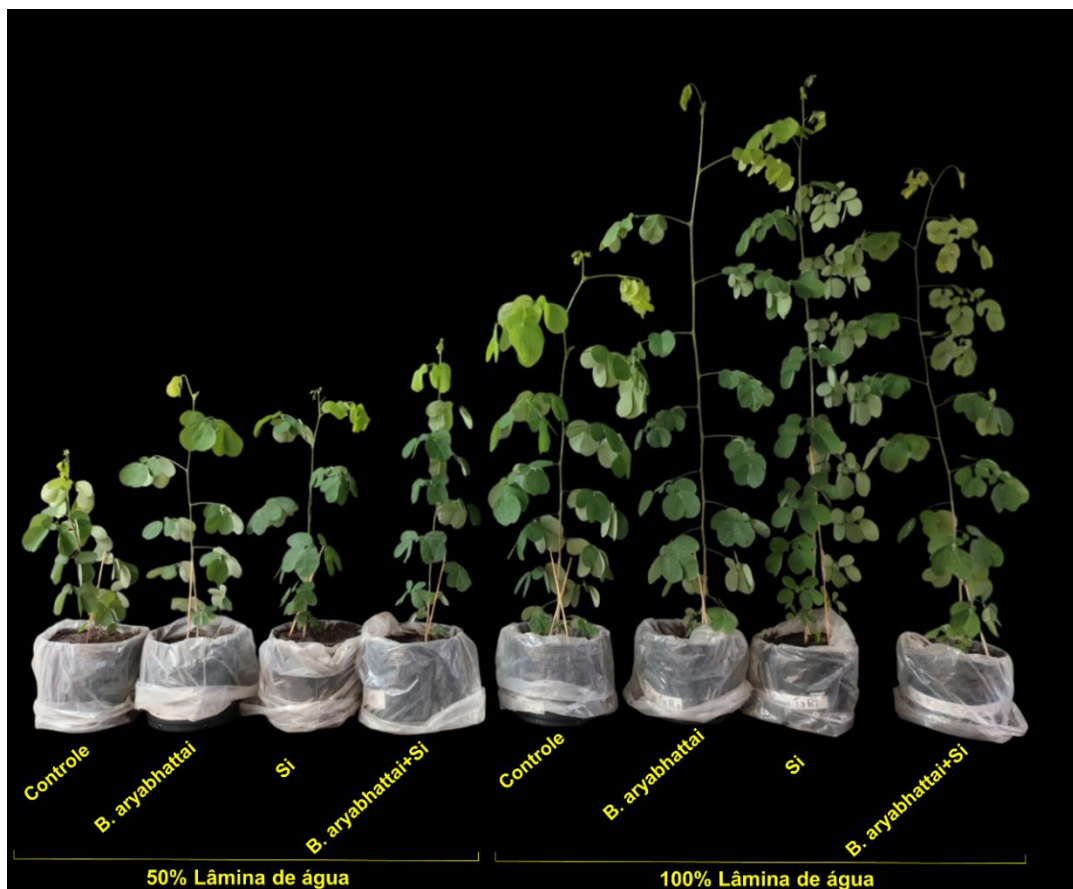
Os dados obtidos foram submetidos ao teste de Shapiro-Wilk para análise da normalidade dos dados e, posteriormente, submetidos a análise de variância (ANOVA) por meio do teste F ($p \leq 0,05$). Quando significativo, as médias foram comparadas pelo teste de Scott-Knott ($p \leq 0,05$), utilizando o software estatístico AgroEstat (versão 1.1.0.712) (Barbosa e Maldonado, 2011).

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Crescimento

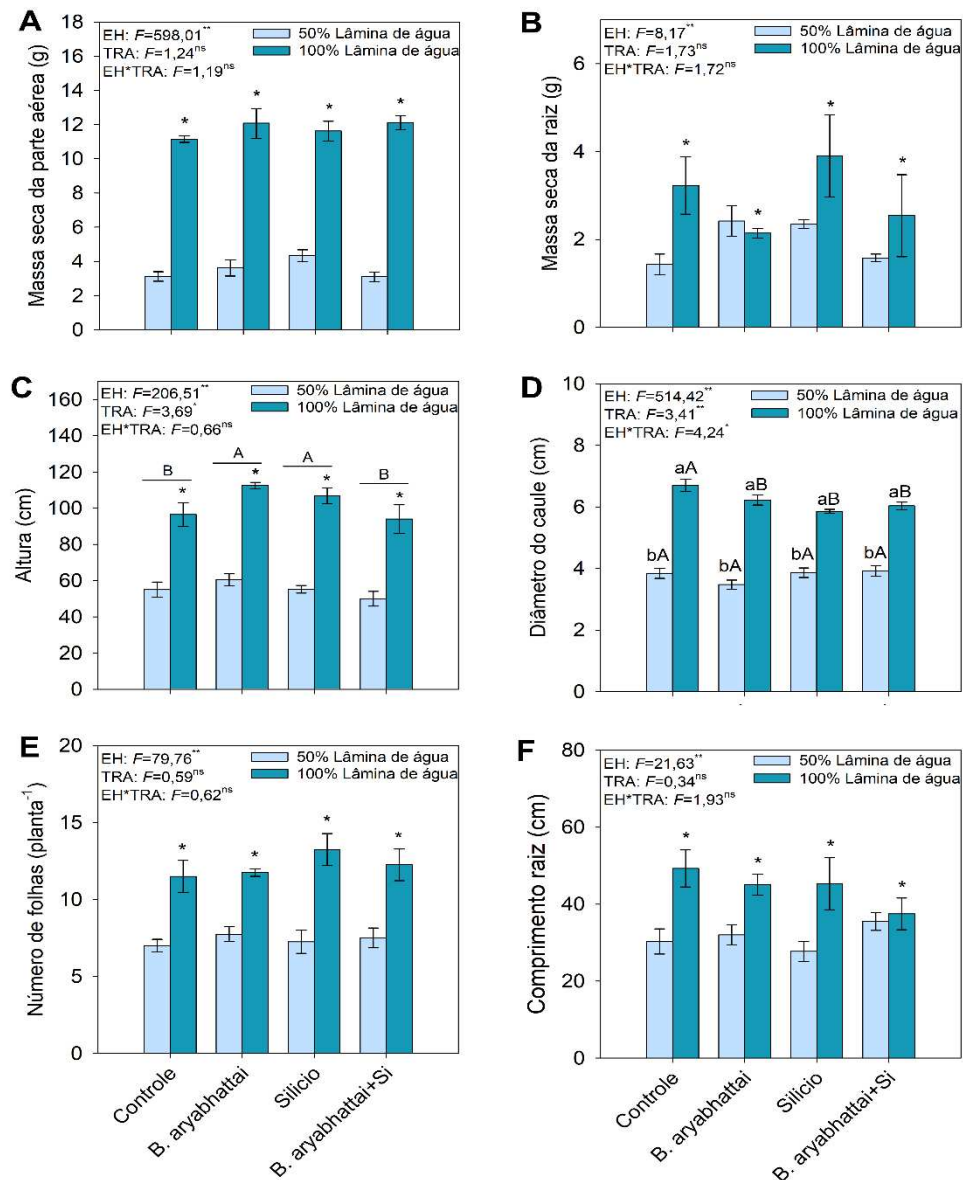
O crescimento das mudas de *Mimosa caesalpinifolia* Benth. variou de acordo com as lâminas de água e os tratamentos (figura 2). Houve efeito significativo das lâminas para a massa seca da parte aérea, massa seca da raiz, número de folhas e comprimento da raiz, com as maiores médias para as lâminas de 100% de água (Figura 3 A, B, E e F). Os níveis de água a 100% influenciaram no aumento da MSPA cerca de 300%, MSR em cerca de 30%, número de folhas valores de 133% e o comprimento da raiz em ~85%, superiores ao controle (Figura 3 A e B). Em relação à altura da planta (Figura 3 C) teve efeito significativo isolado da lâmina e dos tratamentos, onde os tratamentos com *B. aryabhattai* e silício de forma isolada obtiveram alturas maiores quando comparados aos demais tratamentos e controle. Já o diâmetro do caule (Figura 3 D) houve interação significativa ($p < 0,05$) entre as lâminas de água e os tratamentos, porém apesar da interação as médias das lâminas de 100% se sobressaíram em relação as de 50%, aumentando cerca de 84%.

Figura 2 – Crescimento das mudas de *Mimosa caesalpinifolia* Benth.



Fonte: Elaborado pela autora, 2024

Figura 3 – Parâmetros de crescimento das mudas de *M. caesalpinifolia* Benth. submetidas a diferentes tratamentos e níveis de lâmina de água (50% e 100%). Massa seca da parte aérea (A), massa seca da raiz (B), altura (C), diâmetro do caule (D), número de folhas (E) e comprimento da raiz (F).



As barras representam a média de quatro repetições e a linha nas barras indicam o erro padrão (\pm). Letras maiúsculas indicam diferenças significativas entre os tratamentos dentro da mesma lâmina de água (50% ou 100%). Letras maiúsculas sublinhadas, quando presentes, indicam diferenças significativas entre os tratamentos, independentemente das lâminas de água. Letras minúsculas e asteriscos indicam diferenças significativas entre plantas com lâmina de 50% e 100% dentro do mesmo tratamento pelo método de Scott-Knott ao nível de 5% de significância ($p<0,05$).

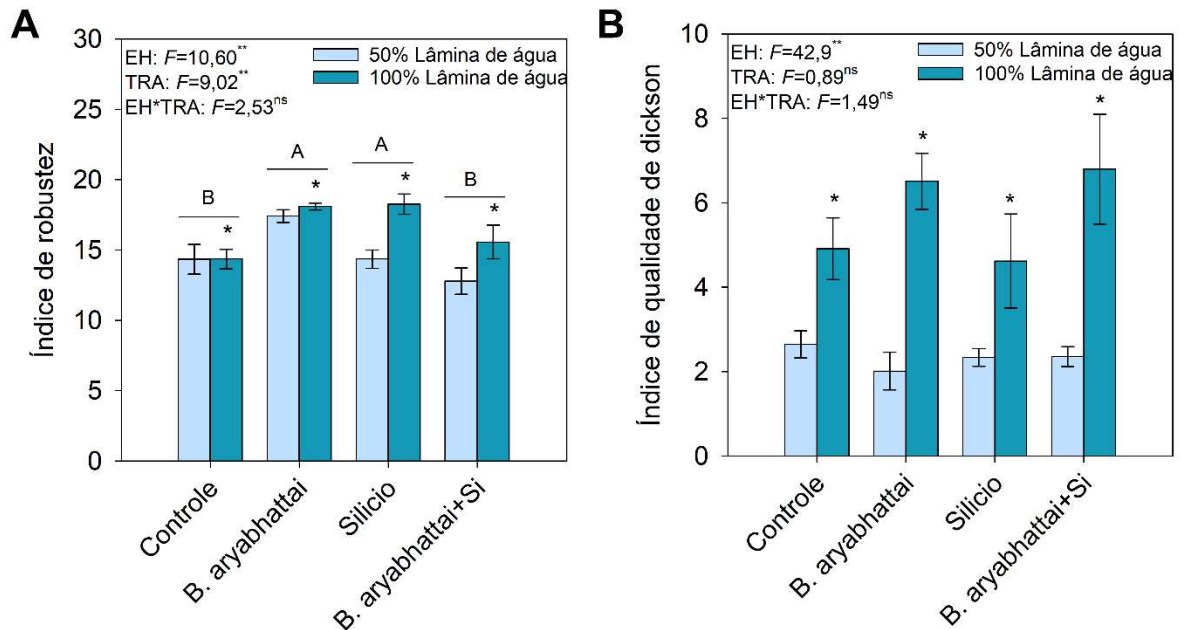
Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

O estresse hídrico demonstrou ser um fator limitante significativo para o desenvolvimento das mudas, reforçando a importância da disponibilidade constante de água, especialmente durante as fases iniciais de crescimento. Estudos que investigam o impacto do déficit hídrico sobre o desenvolvimento de espécies nativas, como o realizado por Antas (2024), evidenciam a sensibilidade da *Mimosa caesalpiniiifolia* à limitação hídrica, especialmente na fase inicial de crescimento. Nesse estudo, regimes diferenciados de irrigação resultaram em variações significativas na altura das mudas, com reduções marcantes observadas nos tratamentos submetidos a 50% da capacidade de campo. Tais resultados demonstram que a restrição no fornecimento de água compromete diretamente o desenvolvimento vegetativo, limitando o acúmulo de biomassa e a expressão do potencial da espécie. As reduções observadas no número de folhas, comprimento da raiz e diâmetro do caule são respostas comuns de espécies vegetais submetidas ao estresse hídrico. Entretanto, a intensidade dessas respostas varia conforme a adaptação fisiológica e o potencial genético das plantas (Paiva et al., 2023). Embora os tratamentos com inoculação de *Bacillus aryabhattai* e aplicação de silício não tenham diferido estatisticamente dos demais, foi possível observar uma tendência de maior crescimento em altura nessas mudas. Plantas inoculadas com rizobactérias geralmente apresentam respostas mais evidentes a partir dos 90 dias de cultivo, possivelmente devido ao tempo necessário para o estabelecimento da simbiose. Silva & Sousa, (2024) relatou que respostas expressivas dessas interações costumam ocorrer entre 120 e 270 dias após a inoculação. No que diz respeito ao silício, não houve influência significativa, a não ser para a altura isoladamente. Não tendo assim um efeito tão expressivo no crescimento, visto que esses efeitos variam muito com a espécie vegetal, com as condições a elas impostas no estudo, tempo de crescimento da espécie e a translocação do elemento na planta.

6.2 Qualidade das mudas

Houve efeito isolado da lâmina e dos tratamentos, mas sem interação significativa. Em média, o fornecimento de 100% de lâmina elevou o índice de robustez em ~8% comparado a 50%, independentemente do tratamento. Os tratamentos com silício isolado e *B. aryabhattai* apresentaram os maiores valores, sendo ~30% superior ao controle, em ambas as lâminas (Figura 4A). O índice de qualidade de Dickson foi influenciado apenas pela lâmina de água, com aumentos expressivos (~140%) sob 100% de lâmina em relação a 50%, independentemente dos tratamentos aplicados (Figura 4B). Os tratamentos não diferiram estatisticamente entre si ($p > 0,05$).

Figura 4 – Índice de robustez (A) e índice de qualidade de Dickson (B) em mudas de *Mimosa caesalpiniiifolia* Benth. submetidas a diferentes tratamentos e lâminas de água.



As barras representam a média de quatro repetições e a linha nas barras indicam o erro padrão (\pm). Letras maiúsculas sublinhadas indicam diferenças significativas entre os tratamentos, independentemente das lâminas de água. Asteriscos indicam diferenças significativas entre plantas com lâmina de 50% e 100% dentro do mesmo tratamento pelo método de Scott-Knott ao nível de 5% de significância ($p<0,05$).

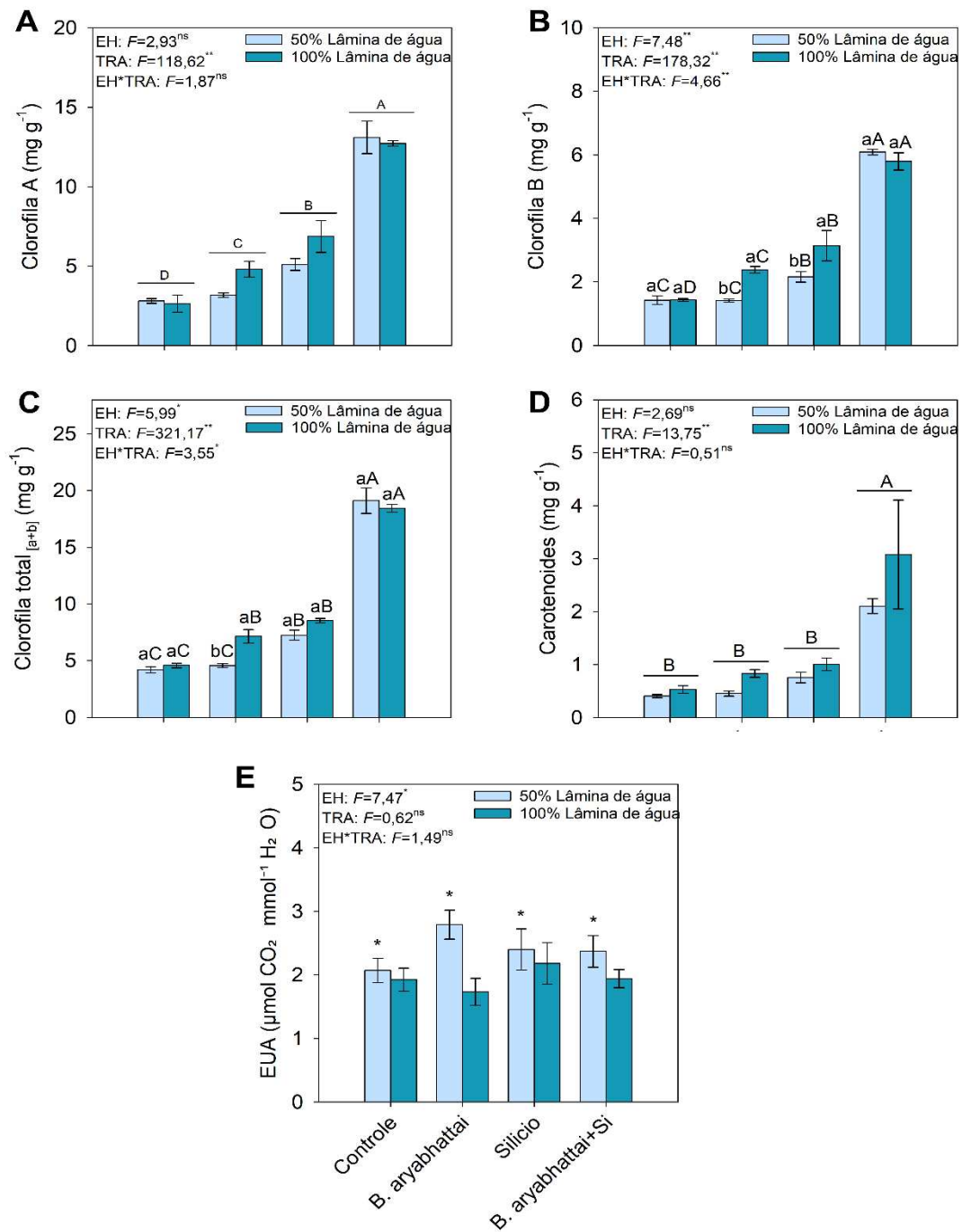
Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

O fornecimento da lâmina completa de água proporcionou aumento no índice de robustez das mudas, independentemente dos tratamentos, evidenciando a importância da disponibilidade hídrica adequada para o desenvolvimento saudável das plantas (Paula et al., 2024). Os tratamentos com silício isolado e *Bacillus aryabhattai* destacaram-se por promoverem maior robustez nas mudas em comparação ao controle, independentemente da lâmina aplicada. Isso sugere que ambos os tratamentos contribuem positivamente para o fortalecimento estrutural das mudas, possivelmente por melhorarem processos fisiológicos e metabólicos que favorecem o crescimento e a resistência das plantas (Castelo Sousa et al 2023). Em relação ao índice de qualidade de Dickson, este foi influenciado exclusivamente pela lâmina de água, com valores significativamente superior nas mudas que receberam a lâmina completa. A ausência de diferenças estatísticas entre os tratamentos para esse índice indica que a quantidade de água disponível foi o fator determinante para o equilíbrio e distribuição de biomassa nas mudas (Alonso et al., 2024).

6.3 Parâmetros fisiológicos

Os parâmetros fisiológicos foram influenciados de forma variável pelas condições aplicadas. Houve efeito isolado das lâminas de irrigação e dos tratamentos nas médias de clorofila A (Figura 5A) e carotenoides (Figura 5D), sendo o tratamento com *Bacillus aryabhatai* + silício o que apresentou os melhores resultados, com aumentos expressivos de 460% (clorofila A) e cerca de 650% (carotenoides) em relação ao controle. A clorofila B (Figura 5B) e a clorofila total (Figura 5C) apresentaram interação significativa ($p < 0,05$) entre as lâminas de irrigação e os tratamentos, com destaque novamente para o tratamento *B. aryabhatai* + silício em relação aos demais. A eficiência do uso da água (Figura 5E) foi influenciada apenas pela lâmina de irrigação, sendo maior (55%) sob 50% da capacidade de campo em comparação a 100%.

Figura 5 – Pigmentos fotossintéticos (A, B, C e D) e eficiência do uso da água em mudas de *Mimosa caesalpiniiifolia* Benth. submetidas a diferentes tratamentos e lâminas de água.



As barras representam a média de quatro repetições e a linha nas barras indicam o erro padrão (\pm). Letras maiúsculas indicam diferenças significativas entre os tratamentos dentro da mesma lâmina de água (50% ou 100%). Letras maiúsculas sublinhadas, quando presentes, indicam diferenças significativas entre os tratamentos, independentemente das lâminas de água. Letras minúsculas e asteriscos indicam diferenças significativas entre plantas com lâmina de 50% e 100% dentro do mesmo tratamento pelo método de Scott-Knott ao nível de 5% de significância ($p<0,05$).

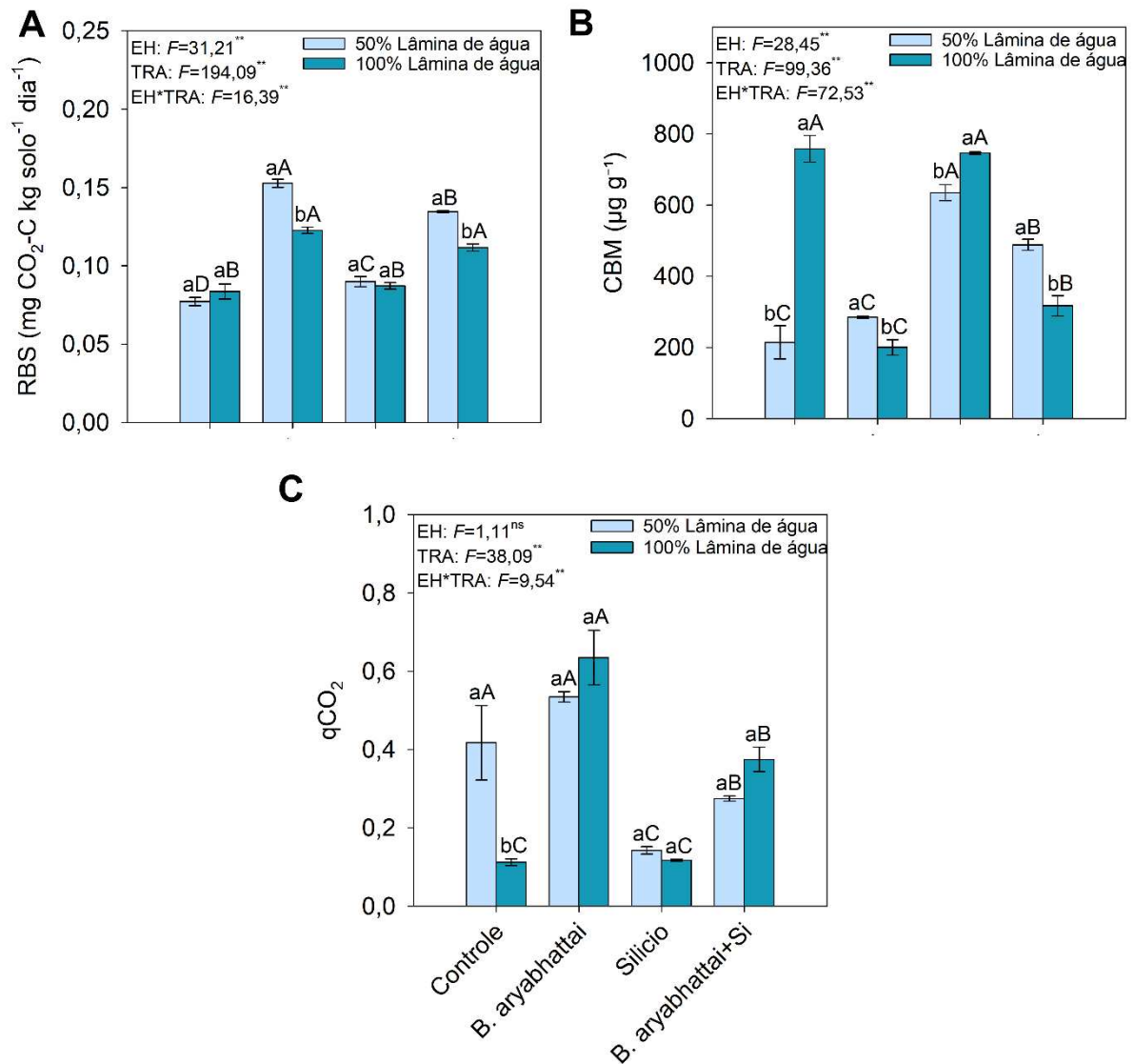
Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

A inoculação com *Bacillus aryabhattai* combinada à aplicação de silício aumentou significativamente os pigmentos fotossintéticos nas mudas de *Mimosa caesalpinifolia*. O silício melhora o arranjo foliar, otimiza a distribuição luminosa e reduz a transpiração, elevando a eficiência hídrica (Huang et al., 2025). As concentrações de clorofila A, B, total e carotenoides foram superiores com o uso de silício, indicando maior capacidade fotossintética e transporte eletrônico (Singh, 2022). *B. aryabhattai* reforça esses efeitos, promovendo aumento dos pigmentos e melhor desempenho fisiológico (Azeem et al., 2024). A sinergia entre silício e *B. aryabhattai* sustenta o desempenho fotoquímico e potencializa a produtividade (Guo et al., 2024). O déficit hídrico elevou a eficiência do uso da água (EUA), principalmente sob 50% da lâmina de irrigação, refletindo uma adaptação fisiológica das mudas ao estresse. O aumento da EUA indica que as plantas otimizam o uso da água disponível, reduzindo perdas por transpiração e mantendo a fotossíntese (Almeida, 2021). Essa resposta adaptativa está associada à manutenção dos processos fotoquímicos e ao ajuste estomático que preserva a água sem comprometer a fixação de carbono, conforme observado em outras espécies tolerantes ao déficit (Saeed et al., 2024). Dessa forma, a combinação de *B. aryabhattai* e silício pode favorecer a eficiência hídrica por meio do aprimoramento da fotossíntese e redução do estresse oxidativo, contribuindo para a sobrevivência e crescimento das mudas em ambientes semiáridos (Akhtar et al., 2021)

6.4 Atividade microbiana

Houve interação significativa ($p < 0,05$) entre as lâminas de água e os tratamentos nas variáveis de atividade microbiana do solo. A inoculação com *Bacillus aryabhattai* apresentou a maior média de respiração basal (Figura 6A), com aumento de 128% em relação aos demais tratamentos, e o maior quociente metabólico (Figura 6C), cerca de 500% superior ao controle com 100% de lâmina, indicando maior atividade microbiana. Por outro lado, no carbono da biomassa microbiana (Figura 6B), esse tratamento apresentou a menor média, aproximadamente 295% inferior aos demais, sugerindo maior gasto energético para manutenção da atividade microbiana do que para crescimento. Esses resultados evidenciam o efeito de *B. aryabhattai* na intensificação da atividade microbiana do solo.

Figura 6 – Respiração basal do solo (RBS) (A), carbono da biomassa microbiana (CBM) (B) e quociente metabólico (qCO_2) em mudas de *Mimosa caesalpinifolia* Benth. submetidas a diferentes tratamentos e lâminas de água.



As barras representam a média de quatro repetições e a linha nas barras indicam o erro padrão (\pm). Letras maiúsculas indicam diferenças significativas entre os tratamentos dentro da mesma lâmina de água (50% ou 100%). Letras minúsculas indicam diferenças significativas entre plantas com lâmina de 50% e 100% dentro do mesmo tratamento pelo método de Scott-Knott ao nível de 5% de significância ($p<0,05$).

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

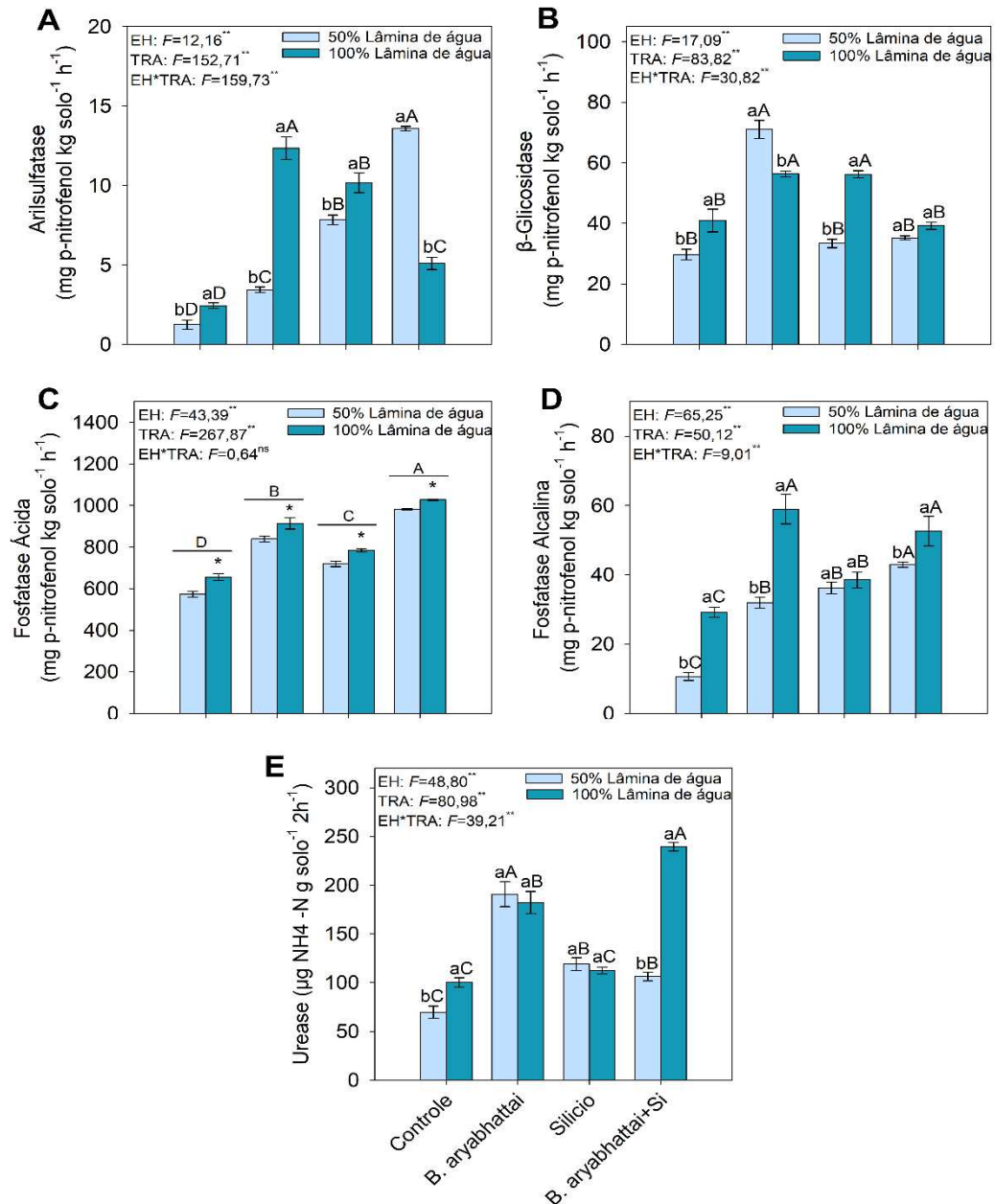
A respiração basal do solo (RBS) apresentou maiores valores nos tratamentos que incluíram a inoculação com *Bacillus aryabhattai*, o que reflete o aumento da atividade metabólica microbiana promovida pela presença do microrganismo (Akram et al., 2024). Nos

tratamentos sem inoculação, observou-se um menor valor de RBS, indicando menor atividade biológica no solo. A RBS é considerada um indicador sensível da qualidade do carbono orgânico disponível para os micro-organismos heterotróficos. Altas taxas respiratórias estão associadas a uma maior atividade microbiana e à rápida mineralização da matéria orgânica, o que favorece a disponibilização de nutrientes para as plantas (Zhou et al., 2024). Entretanto, os tratamentos com *B. aryabhattai* também apresentaram os maiores valores de quociente metabólico (qCO_2), o que pode indicar uma menor eficiência da biomassa microbiana na incorporação de carbono, possivelmente associada a um estado de estresse fisiológico ou a um ambiente desequilibrado (Castelo Sousa et al. (2023). O aumento do qCO_2 , portanto, sugere maior gasto energético por unidade de biomassa microbiana, refletindo uma comunidade menos eficiente no uso do carbono assimilado (Iliev et al., 2024).

6.5 Atividade enzimática do solo

As atividades enzimáticas variaram conforme a lâmina de água e os tratamentos, com destaque para os efeitos positivos da inoculação com *Bacillus aryabhattai*, isoladamente ou em associação ao silício. A arilsulfatase apresentou o maior incremento sob 50% da lâmina nos tratamentos com *B. aryabhattai* + Si, com aumento superior a 300% em relação ao controle (Figura 7A). A β -glicosidase também respondeu positivamente à inoculação, com elevações superiores a 100%, especialmente nos tratamentos combinados com silício (Figura 7B). A fosfatase ácida teve aumento de até 150%, com melhores respostas sob lâmina completa (Figura 7C), enquanto a fosfatase alcalina apresentou incremento médio de 200%, destacando-se o tratamento com *B. aryabhattai* + Si (Figura 7D). A urease, por sua vez, teve sua atividade amplificada entre 160% e 200% nos tratamentos com inoculação, sendo o efeito mais expressivo observado sob 100% da lâmina com *B. aryabhattai* + Si (Figura 7E).

Figura 7 – Determinação da atividade das enzimas Arilsulfatase (A), B-Glicosidase (B), Fosfatase ácida (C), Fosfatase alcalina (D) e Urease (E) em mudas de *Mimosa caesalpinifolia* Benth. submetidas a diferentes tratamentos e lâminas de água.



As barras representam a média de quatro repetições e a linha nas barras indicam o erro padrão (\pm). Letras maiúsculas indicam diferenças significativas entre os tratamentos dentro da mesma lâmina de água (50% ou 100%). Letras maiúsculas sublinhadas, quando presentes, indicam diferenças significativas entre os tratamentos, independentemente das lâminas de água. Letras minúsculas e asteriscos indicam diferenças significativas entre plantas com lâmina de 50% e 100% dentro do mesmo tratamento pelo método de Scott-Knott ao nível de 5% de significância ($p < 0,05$).

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

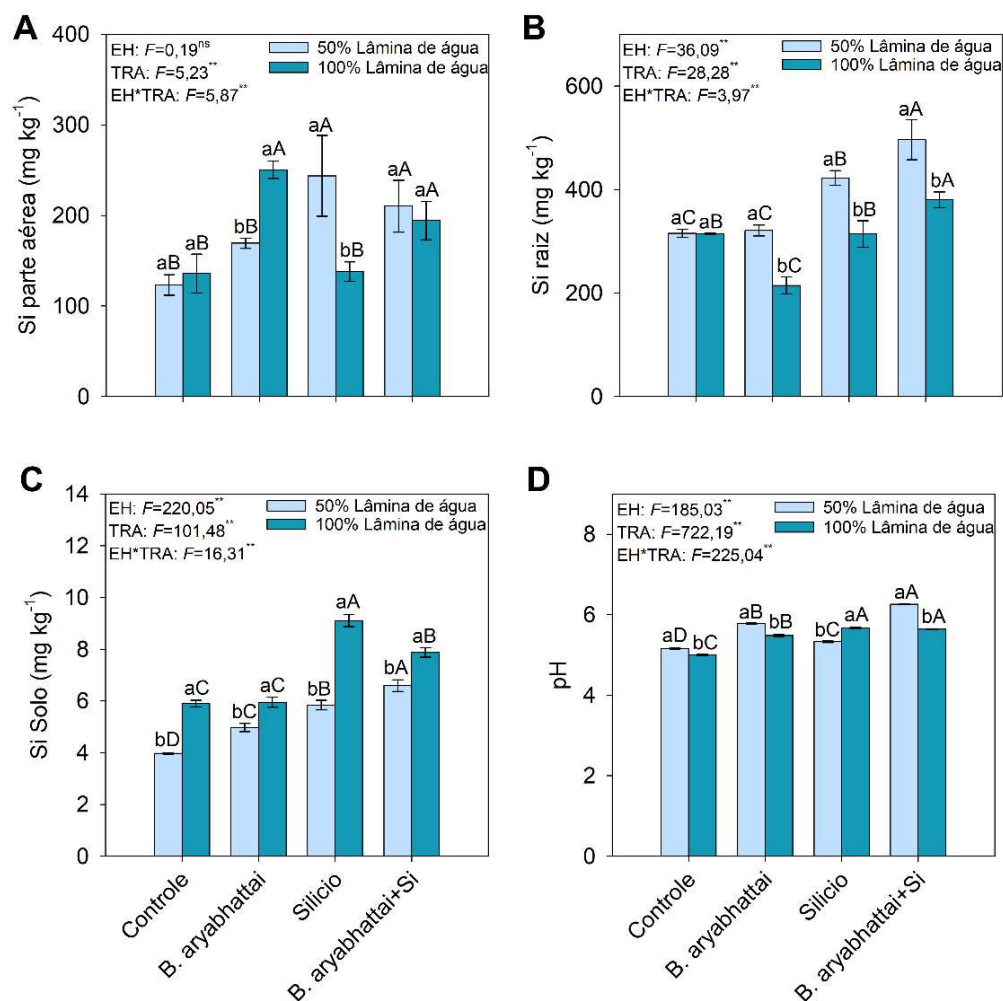
De acordo com os resultados obtidos, as atividades enzimáticas do solo foram influenciadas pelos tratamentos com *Bacillus aryabhattai* e silício, bem como pela disponibilidade hídrica, refletindo as respostas metabólicas da microbiota do solo às condições experimentais (Guo et al., 2024). A inoculação com *B. aryabhattai*, isolada ou em combinação com silício, promoveu aumentos significativos nas atividades de arilsulfatase, β -glicosidase, fosfatases ácida e alcalina, e urease, independentemente da lâmina de água aplicada. Isso evidencia o papel do microrganismo como agente bioestimulante, potencializando a produção de enzimas extracelulares que facilitam a mineralização e liberação dos nutrientes essenciais para as plantas (Hamid et al., 2021). Especificamente, a arilsulfatase apresentou maior atividade nos tratamentos combinados com *B. aryabhattai* e silício sob condições de menor disponibilidade hídrica, indicando intensificação da ciclagem do enxofre mesmo em estresse. (Rajesaheb et al., 2025). A β -glicosidase também foi estimulada pela inoculação, reforçando a degradação da matéria orgânica e o fornecimento de carbono. As fosfatases ácida e alcalina mostraram respostas positivas à presença do microrganismo e do silício, sugerindo melhora na disponibilidade de fósforo assimilável. A urease foi amplamente estimulada pela inoculação, especialmente em condições de lâmina hídrica completa, indicando maior mineralização do nitrogênio (Bungau et al., 2021). Embora o silício não tenha causado diferenças estatísticas isoladas, os dados sugerem que sua associação com a inoculação exerce efeito potencializador da atividade enzimática, possivelmente por alterações no microambiente do solo que favorecem a microbiota. O estresse hídrico, apesar de limitar o crescimento das mudas, teve efeito menos pronunciado sobre a atividade enzimática, com tendência à redução sob menor lâmina, alinhado com estudos que indicam a sensibilidade das enzimas à disponibilidade de água (Khajeeyan et al., 2024).

6.6 Silício e pH

Houve interação significativa ($p < 0,05$) entre lâmina de água e tratamentos em todas as variáveis analisadas (Figura 8). Apesar da interação significativa, o tratamento *B. aryabhattai* + Si apresentou os maiores valores em ambas as lâminas, sendo ~50% superior ao controle. No entanto, o efeito da lâmina foi modesto ~10% de aumento com a lâmina de 100% em relação a lâmina de 50%. O padrão de superioridade do tratamento *B. aryabhattai* + Si foi consistente em ambas as condições hídricas (Figura 8A). A interação indicou que, especificamente no tratamento *B. aryabhattai* + Si, o fornecimento de 50% de lâmina resultou em maior acúmulo de silício na raiz quando comparado à lâmina de 100%, indicando que a menor disponibilidade hídrica pode ter favorecido a absorção ou acúmulo de Si nesse caso (Figura 8 B). O tratamento

B. aryabhatai + Si manteve o padrão de maiores teores em ambas as lâminas, sendo ~100% superior ao controle em 100% de lâmina. Além disso, o teor de Si no solo aumentou ~85% com 100% de lâmina comparado a 50%, independentemente do tratamento (Figura 8 C). O pH foi consistentemente maior nos tratamentos com *Bacillus aryabhatai*+silício, o efeito da lâmina de 50% foi expressivo, resultando em elevação de ~25% no pH médio do solo (Figura 8 D).

Figura 8 – Quantificação do silício na parte aérea (A), raiz (B) e no solo (C), pH da solução do solo (D) em mudas de *Mimosa caesalpinifolia* Benth. submetidas a diferentes tratamentos e lâminas de água.



As barras representam a média de quatro repetições e a linha nas barras indicam o erro padrão (\pm). Letras maiúsculas indicam diferenças significativas entre os tratamentos dentro da mesma lâmina de água (50% ou 100%). Letras minúsculas indicam diferenças significativas entre plantas com lâmina de 50% e 100% dentro do mesmo tratamento pelo método de Scott-Knott ao nível de 5% de significância ($p<0,05$).

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

O silício (Si) é absorvido pelas plantas ao longo de todo o seu ciclo de desenvolvimento por meio de transporte ativo, mediado por proteínas específicas de membrana codificadas por genes determinados (Ma & Takahashi, 2002). A disponibilidade do silício no solo está correlacionada ao pH edáfico, sendo que valores mais elevados de pH aumentam a solubilidade e, consequentemente, a disponibilidade do elemento na rizosfera, influenciando sua absorção pelas raízes (Oliveira et al., 2007; Castro & Crusciol, 2013a; 2013b). No presente estudo, o pH do solo foi ligeiramente ácido, variando entre 4,9 e 6,3, apresentando valores mais elevados nos tratamentos com aplicação de silício e sob menor disponibilidade hídrica.

A maior parte do Si na planta é transportada pela transpiração via fluxo de massa na seiva do xilema, quando a planta está condicionada a um estresse hídrico, ela fecha os estômatos para reduzir a perda de água, com isso a transpiração diminui, influenciando da diminuição do fluxo da seiva xilemática e consequentemente tendo um menor transporte de Si para a parte aérea.

Os resultados indicam que *Mimosa caesalpiniiifolia* se enquadra na categoria de planta não acumuladora, similar a outras leguminosas como a soja, embora o silício ainda exerça efeitos positivos sobre seu crescimento (Sousa et al., 2018). Estudos indicam que a aplicação de silício promoveu respostas benéficas no desenvolvimento em culturas leguminosas. A elevação na disponibilidade de silício influencia indiretamente a fisiologia das plantas, especialmente sob condições de estresse abiótico, ao modular mecanismos de defesa e aumentar a tolerância a adversidades (Ranjan et al., 2021).

7 CONCLUSÕES

O desenvolvimento das mudas de *Mimosa caesalpiniifolia* Benth. foi afetado pela disponibilidade hídrica, com redução significativa sob a lâmina de 50%, evidenciando o efeito limitante do estresse hídrico. O Índice de Qualidade de Dickson foi superior com 100% da lâmina, mas tratamentos com *Bacillus aryabhattai*, isolado ou com silício, promoveram incrementos mesmo sob déficit hídrico. O Índice de Robustez foi maximizado na presença conjunta de *B. aryabhattai* e silício, refletindo melhorias em altura e diâmetro do caule. A associação entre o microrganismo e o silício também favoreceu os pigmentos fotossintéticos, enquanto a eficiência do uso da água aumentou sob estresse. *B. aryabhattai* elevou a respiração basal e a atividade enzimática, enquanto o silício aumentou o carbono da biomassa microbiana. O acúmulo de silício foi maior nas raízes, e o pH do solo se elevou levemente com menor lâmina. Assim, *B. aryabhattai* contribuiu positivamente ao crescimento mesmo sob estresse hídrico (Hipótese 1), o silício atenuou os efeitos do déficit (Hipótese 2), e a combinação de ambos mostrou efeito sinérgico sobre os parâmetros avaliados (Hipótese 3), destacando-se como estratégia viável para a produção de mudas resilientes.

REFERÊNCIAS

- ABDALLA, M. M. Silicon and salinity: its mechanisms and role in plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 83, p. 267–276, 2011.
- ADAM, E.; HEUER, H.; HALLMANN, J. Bacterial antagonists of *Fusarium oxysporum* in the tomato rhizosphere. **FEMS Microbiology Ecology**, v. 85, n. 1, p. 63–74, 2014.
- AGARIE, S. et al. Effects of silicon on tolerance to water deficit and heat stress in rice plants (*Oryza sativa* L.), monitored by electrolyte leakage. **Plant Production Science**, v. 1, n. 2, p. 96–103, 1998.
- AHMAD, R. Water relations and silicon application in wheat under saline environment. **Plant and Soil**, v. 147, p. 143–151, 1992.
- ALCÂNTARA, E. N. de et al. Silício no controle da traça-das-crucíferas em couve. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, n. 2, p. 118–125, 2010.
- ALMEIDA, E. P. de et al. Gas exchange and water use efficiency in seedlings of tree species from caatinga under water levels and potassium. **Revista Principia**, n. 53, p. 218–230, 2021.
- ALONSO, R. S.; SODRÉ, G. A.; SILVA, D. C. Dickson Quality Index of Cocoa Genotypes Under Water Deficit. **Forests**, v. 15, n. 12, p. 2054, 2024.
- AKHTAR, N. et al. Synergistic effects of plant growth promoting rhizobacteria and silicon dioxide nano-particles for amelioration of drought stress in wheat. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 166, p. 160–176, 2021.
- AKRAM, W. et al. Comparative effect of seed coating and biopriming of *Bacillus aryabhattai* Z-48 on seedling growth, growth promotion, and suppression of *Fusarium* wilt disease of tomato plants. **Microorganisms**, v. 12, n. 4, p. 792, 2024.
- ANSARI, M. I. et al. Exogenous silicon and PGPR strains synergistically modulate growth, chlorophyll content, water status and ROS scavenging under heat stress in rice. **Frontiers in Microbiology**, v. 14, 2023.
- ANTAS, R. N., MENDONÇA, L. F. D. M., SILVA, J. D. N., GUIMARÃES, A. G., ARAÚJO, L. D. M., FREIRE, A. L. D. O., ... & DE LUCENA, J. V. (2024). Production of mimosa caesalpinifolia benth seedlings using a water-absorbing polymer and different water regimes. **Revista Caatinga**, 37, e12314.
- AZEEM, M. A. et al. Halotolerant *Bacillus aryabhattai* Strain PM34 Mitigates Salinity Stress and Enhances the Physiology and Growth of Maize. **Journal of Plant Growth Regulation**, p.

1–19, 2024.

BATISTA, L. R. et al. Respiração basal do solo sob diferentes sistemas de manejo de pastagem. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 37, n. 2, p. 232–238, 2008.

BERNARDO, S. et al. **Manual de irrigação**. 9. ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 2019. 545 p.

BURTET, L. Mecanismos de defesa de plantas induzidos pelo silício. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável**, v. 8, n. 3, p. 68–79, 2018.

BUNGAU, S. et al. Expatriating the impact of anthropogenic aspects and climatic factors on long-term soil monitoring and management. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, n. 24, p. 30528–30550, 2021.

CASTELO SOUSA, H. et al. **Bacillus aryabhattai mitigates the effects of salt and water stress on the agronomic performance of maize under an agroecological system**. *Agriculture*, Basel, v. 13, n. 6, p. 1150, 2023.

CAMARGO, M. S. et al. Silício na agricultura: uma revisão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 40, e0150591, 2016.

CANTUÁRIO, F. S. et al. Efeito do silício no crescimento de plantas sob estresse. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 9, n. 1, p. 139–144, 2014.

CARDOSO, E. J. B. N.; NOGUEIRA, M. A. Biologia do solo. **Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 2007.

CARVALHO, P. E. R. **Espécies arbóreas brasileiras**. Colombo: Embrapa-CNPQ, 1994. 1039 p.

CASTRO, G. S. A.; CRUSCIOL, C. A. C. Ação do silício no crescimento de plantas sob estresse. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 104–113, 2013a.

CASTRO, G. S. A.; CRUSCIOL, C. A. C. Interações entre o silício e a nutrição mineral em plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 1, p. 1–18, 2013b.

CASTELO SOUSA, H. et al. **Bacillus aryabhattai mitigates the effects of salt and water stress on the agronomic performance of maize under an agroecological system**. *Agriculture*, v. 13, n. 6, p. 1150, 2023.

- GUO, X. et al. Effects of the combination of *Bacillus aryabhattai* and calcium peroxide on soil silicon and potassium contents, the yield and quality of facility tomato. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 70, n. 1, p. 1–12, 2024.
- DECHEN, A. R.; NACHTIGALL, G. R. Elementos benéficos. In: NOVAIS, R. F. et al. (org.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS, 2006. p. 127–148.
- DICKSON, A.; LEAF, A. L.; HOSNER, J. F. Quality appraisal of white spruce and white pine seedling stock in nurseries. **The Forestry Chronicle**, v. 36, n. 1, p. 10–13, 1960.
- EIVAZI, F.; TABATABAI, M. A. Glucosidases and galactosidases in soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 20, n. 5, p. 601–606, 1988.
- ELLIOTT, L. F.; SNYDER, J. D. Autoclave digestion of plant tissues for analysis of nitrate, phosphate and potassium. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 22, n. 11–12, p. 1089–1098, 1991.
- EMBRAPA. **Bactérias promotoras de crescimento vegetal e tolerância à seca**. Brasília: Embrapa Semiárido, 2019.
- EMBRAPA. **Biofilmes bacterianos e sua importância na rizosfera**. Brasília: Embrapa, 2017.
- FRANCO, B. D. G. M.; LANDGRAF, M. Avaliação da atividade metabólica de micro-organismos. In: **Microbiologia dos Alimentos**. São Paulo: Atheneu, 2002.
- GLICK, B. R. Beneficial Plant–Bacterial Interactions. **Cham: Springer Nature**, 2020.
- GLICK, B. R. Plant growth-promoting bacteria: mechanisms and applications. **Scientifica**, v. 2012, p. 1–15, 2012.
- GOMES, J. M. Atributos morfológicos e de crescimento de mudas de *Mimosa caesalpiniiifolia* Benth. sob restrição hídrica. **Floresta**, v. 34, n. 3, p. 319–324, 2004.
- GONÇALVES, J. L. de M. et al. **Produção de mudas de espécies florestais em viveiros**. IPEF, v. 45, p. 17–29, 1992.
- GUNES, A. et al. Interactive effects of silicon and drought stress on the photosynthetic performance and antioxidant status in wheat. **Environmental and Experimental Botany**, v. 62, p. 55–62, 2007.
- GUNES, A. et al. Role of silicon in improving plant resistance to abiotic stress. **Biological Trace Element Research**, v. 119, p. 201–211, 2007.

- HAMID, B. et al. Bacterial plant biostimulants: a sustainable way towards improving growth, productivity, and health of crops. **Sustainability**, v. 13, n. 5, p. 2856, 2021.
- HUANG, B. et al. Silicon reduce structural carbon components and its potential to regulate the physiological traits of plants. **Plants**, v. 14, n. 12, p. 1779, 2025.
- IVANI, R. D.; TABATABAI, M. A. Effects of trace elements on arylsulfatase activity in soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 9, n. 5, p. 371–376, 1977.
- ILIEV, I.; MARHOVA, M.; PETROVA, S.; TSANKOVA, M. Influence of phytoremediation on soil microbial biomass and activity in degraded soils. **Ecologia Balkanica**, [S.l.], v. 166-167 (estudo de 2024), p. 166-172, 2024.
- KANDELER, E.; GERBER, H. Short-term assay of soil urease activity using colorimetric determination of ammonium. **Biology and Fertility of Soils**, v. 6, p. 68–72, 1988.
- KIM, Y. H. et al. Silicon-induced cell wall fortification of rice leaves: a possible mechanism of resistance to blast. **Physiological and Molecular Plant Pathology**, v. 59, p. 65–72, 2001.
- KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis: part 1—physical and mineralogical methods**. 2. ed. Madison: ASA/SSSA, 1986. p. 635–662.
- KORNDÖRFER, G. H.; SOUZA, G. F. de. **Análise de silício: solo, planta e fertilizante**. 2. ed. Uberlândia: UFU/ICIAG, 2018.
- MA, J. F.; TAKAHASHI, E. **Soil, fertilizer, and plant silicon research in Japan**. Amsterdam: Elsevier, 2002.
- MA, J. F.; YAMAJI, N. Silicon uptake and accumulation in higher plants. **Trends in Plant Science**, v. 11, n. 8, p. 392–397, 2006.
- MAGALHÃES, A. M. et al. Efeitos do estresse hídrico na eficiência do uso da água em plantas de soja. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, v. 21, n. 4, p. 343–348, 2009.
- MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2. ed. London: Academic Press, 1995.
- MAY, A. et al. Inoculação de *Bacillus aryabhattai* em cana-de-açúcar sob déficit hídrico. **Revista Ciência Agronômica**, v. 50, p. 334–342, 2019.
- MENGEL, K.; KIRKBY, E. A. **Principles of plant nutrition**. 4. ed. Bern: International Potash Institute, 1987.

MENEGALE, M.; CASTRO, C.; MANCUSO, M. A. C. **O silício e sua função nas plantas. Informações Agronômicas**, v. 149, p. 1–12, 2015.

MELO, L. A. et al. Índices morfológicos e de qualidade de mudas de espécies florestais: aspectos conceituais, aplicações e interpretações. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 38, n. 96, p. 1–11, 2018.

MORAIS, M. C. de. **Interação entre *Bradyrhizobium japonicum* e *Bacillus aryabhattai* sob condições de estresse hídrico em soja**. 2018. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

OXBOROUGH, K. Increasing the photosynthetic capacity of crops. **Plant Cell and Environment**, v. 27, p. 989–1000, 2004.

PARK, H. J. et al. *Bacillus aryabhattai* SRB02 enhances drought stress tolerance in plants by modulating expression of stress-responsive genes and ROS scavenging. **Scientific Reports**, v. 7, p. 1–12, 2017.

PAIVA, L. L. D., AZEVEDO, T. K. B. D., PIMENTA, A. S., CANTO, J. L. D., SOUZA, M. J. C. D., & UCELLA FILHO, J. G. M. (2023). Effect of thinning on volumes of biomass and bark tannins content of *mimosa caesalpiniiifolia* Benth. trees. **Revista Árvore**, 47, e 4728.

PAULA, E. H. L. D. et al. Potassium silicate and light availability affect photochemical efficiency and morphology of *Alibertia edulis*. **Scientia Agricola**, v. 81, p. e20230006, 2024.

PEREIRA, S. C. et al. Resistência induzida por silício ao oídio em morangueiro. **Tropical Plant Pathology**, v. 34, n. 3, p. 152–155, 2009.

RAJESAHAB, K. S. et al. Bio-stimulant in improving crop yield and soil health. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 56, n. 3, p. 458–493, 2025.

REZENDE, J. C. et al. Bactérias promotoras de crescimento de plantas e seus efeitos fisiológicos. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável**, v. 11, n. 3, p. 47–55, 2021.

RIBEIRO, D. P. et al. Efeito do silício sobre plantas. **Ciência Rural**, v. 41, p. 1–7, 2011.

RODRIGUES, F. Á. et al. Changes in phenolic compounds in rice leaves induced by silicon and *Magnaporthe grisea* infection. **Phytopathology**, v. 93, n. 4, p. 534–538, 2003.

RODRIGUES, F. Á. et al. Silicon increases resistance to brown spot in rice. **Phytopathology**, v. 94, p. 177–183, 2004.

SAHARAN, B. Bacteria as phosphate solubilizers in low fertility soils. **African Journal of Microbiology Research**, v. 5, n. 19, p. 2639–2645, 2011.

SAEED, M. et al. Characterization of water-deficit tolerance in Upland cotton (*Gossypium hirsutum* L.) assessing morphological, biochemical, molecular and yield attributes. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 46, n. 1, p. 13, 2024.

SILVA, F. A. S. e; AZEVEDO, C. A. V. de. The Assistat Software Version 7.7 and its use in the analysis of experimental data. **African Journal of Agricultural Research**, v. 11, n. 39, p. 3733–3740, 2016.

SILVA SOUSA, D. L. da et al. Growth regulators on shooting and adventitious rooting of *Mimosa caesalpiniiifolia* adult stem cuttings. **Rhizosphere**, v. 30, p. 100901, 2024.

SINGH, P. et al. Silicon supplementation alleviates the salinity stress in wheat plants by enhancing the plant water status, photosynthetic pigments, proline content and antioxidant enzyme activities. **Plants**, v. 11, n. 19, p. 2525, 2022.

SOUSA, E. C. et al. Physiological changes in *Mimosa caesalpiniiifolia* Benth. seeds from different sources and submitted to abiotic stresses. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 22, n. 6, p. 383–389, 2018.

SOUZA, H. A. D. et al. Sheep manure fertilization in *Mimosa caesalpiniiifolia* in an Albaquult. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 25, n. 4, p. 243–249, 2021.

TABATABAI, M. A.; BREMNER, J. M. Arylsulfatase activity of soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 34, p. 225–229, 1970.

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

TANG, J. et al. Silicon application alters soil bacterial and fungal communities and improves soil health in Cd-contaminated soils. **Plant and Soil**, v. 492, p. 73–89, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-025-07299-5>.

TATAGIBA, S. D. O. et al. Estresse abiótico: déficit hídrico e o uso de silício. **Enciclopédia Biosfera**, v. 12, n. 23, p. 138–152, 2016.

TEIXEIRA, P. C. et al. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 573 p.

VANCE, E. D.; BROOKS, P. C.; JENKINSON, D. S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 19, p. 703–707, 1987.

WELLBURN, A. R. The spectral determination of chlorophylls a and b, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution. **Journal of Plant Physiology**, v. 144, p. 307–313, 1994.

YUAN, Y. et al. Synergistic effects of silicon and beneficial microbes on plant performance under stress: a review. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 886452, 2022.

YUAN, M. et al. Effects of silicon on rhizosphere microbial communities and soil fertility. **Science of The Total Environment**, v. 838, p. 155751, 2022.

ZHOU, J. et al. Pyrogenic organic matter decreases while fresh organic matter increases soil heterotrophic respiration through modifying microbial activity in a subtropical forest. **Biology and Fertility of Soils**, v. 60, n. 4, p. 509–524, 2024.