



CURSO DE BACHAREL EM AGRONOMIA

BACILLUS HAYNESSI, B. ARYABHATAI E B. CIRCULANS COMO ALIADOS NA ATENUAÇÃO DO ESTRESSE HÍDRICO EM PLANTAS DE MILHO (ZEA MAYS L.)

Andréia Mendes da Costa

**Rio Verde, GO
2025**

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO – CAMPUS RIO VERDE.
BACHAREL EM AGRONOMIA**

***BACILLUS HAYNESSI, B. ARYABHATAI E B. CIRCULANS
COMO ALIADOS NA ATENUAÇÃO DO ESTRESSE HÍDRICO
EM PLANTAS DE MILHO (ZEA MAYS L.)***

ANDRÉIA MENDES DA COSTA

Trabalho de Curso apresentado ao Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Bacharel em Agronomia.

Orientadora: Dra Leticia Ferreira de Sousa
Coorientadora: Prof^ª Dra Fernanda dos Santos Farnese

Rio Verde – GO
Fevereiro, 2025

**Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema Integrado de Bibliotecas do IF Goiano - SIBi**

C837b Costa, Andréia Mendes da
Bacillus haynessi, B. aryabhatai e B. circulans como aliados na
atenuação do estresse hídrico em plantas de milho (*Zea mays* L.)
/ Andréia Mendes da Costa. Rio Verde 2025.

62f. il.

Orientadora: Prof^ª. Dra. Leticia Ferreira de Sousa.

Coorientadora: Prof^ª. Dra. Fernanda dos Santos Farnese.

Tcc (Bacharel) - Instituto Federal Goiano, curso de 0220024 -
Bacharelado em Agronomia - Integral - Rio Verde (Campus Rio
Verde).

1. Mudanças climáticas. 2. Déficit hídrico. 3. Ativador
microbiológico (bioinsumo). 4. Tolerância ao estresse abiótico.
5. Milho. I. Título.

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Tese (doutorado) | <input type="checkbox"/> Artigo científico |
| <input type="checkbox"/> Dissertação (mestrado) | <input type="checkbox"/> Capítulo de livro |
| <input type="checkbox"/> Monografia (especialização) | <input type="checkbox"/> Livro |
| <input checked="" type="checkbox"/> TCC (graduação) | <input type="checkbox"/> Trabalho apresentado em evento |

Produto técnico e educacional - Tipo:

Nome completo do autor:

Andréia Mendes da Costa

Matrícula:

2021102200240555

Título do trabalho:

Bacillus haynessi, *B. aryabhatai* e *B. circulans* como aliados na atenuação do estresse hídrico em plantas de milho (*Zea mays* L.)

RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial: Não Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: / /

O documento está sujeito a registro de patente? Sim Não

documento pode vir a ser publicado como livro? Sim Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O(a) referido(a) autor(a) declara:

- Que o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- Que obteve autorização de quaisquer materiais incluídos no documento do qual não detém os direitos de autoria, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- Que cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Documento assinado digitalmente
 ANDREIA MENDES DA COSTA
Data: 16/02/2025 12:57:08-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Rio Verde – GO
Local

/ /
Data

Assinatura do autor e/ou detentor dos direitos autorais

Documento assinado digitalmente
 LETICIA FERREIRA DE SOUSA
Data: 16/02/2025 11:47:00-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Ciente e de acordo:

Assinatura da orientadora



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Ata nº 4/2025 - DPGPI-RV/CMPRV/IFGOIANO

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CURSO

Ao décimo dia do mês de fevereiro de dois mil e vinte e cinco, às 08:00 horas, reuniu-se a Banca Examinadora composta por: Profa. Leticia Ferreira de Sousa (orientadora), Prof. Roberto Gomes Vital (membro interno) e Profa. Paula Sperotto Alberto Faria (membro interno), para examinar o Trabalho de Curso (TC) intitulado “*Bacillus haynessi*, *B. aryabhatai* e *B. circulans* como aliados na atenuação do estresse hídrico em plantas de milho (*Zea mays* L.)” de Andréia Mendes da Costa, estudante do curso de Agronomia do IF Goiano – Campus Rio Verde, sob Matrícula nº 2021102200240555. A palavra foi concedida à estudante para a apresentação oral do TC, em seguida houve arguição do candidato pelos membros da Banca Examinadora. Após tal etapa, a Banca Examinadora decidiu pela APROVAÇÃO da estudante. Ao final da sessão pública de defesa foi lavrada a presente ata, que, após apresentação da versão corrigida do TC, foi assinada pelos membros da Banca Examinadora e Mediador de TC.

Rio Verde, 10 de fevereiro de 2025.

Leticia Ferreira de Sousa

Orientadora

Roberto Gomes Vital

Membro da Banca Examinadora

Paula Sperotto Alberto Faria

Membro da Banca Examinadora

Pablo da Costa Gontijo

Mediador de TC

Observação:

() O(a) estudante não compareceu à defesa do TC.

Documento assinado eletronicamente por:

- **Leticia Ferreira de Sousa**, 2023202344060002 - Discente, em 10/02/2025 10:17:05.
- **Roberto Gomes Vital**, 2023102343860002 - Discente, em 10/02/2025 10:30:02.
- **PAULA SPEROTTO ALBERTO FARIA**, 2023102344060003 - Discente, em 10/02/2025 13:56:47.
- **Pablo da Costa Gontijo**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 11/02/2025 00:40:51.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 07/02/2025. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 673220

Código de Autenticação: 1c807bd038



INSTITUTO FEDERAL GOIANO

Campus Rio Verde

Rodovia Sul Goiana, Km 01, Zona Rural, 01, Zona Rural, RIO VERDE / GO, CEP 75901-970

(64) 3624-1000

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a Deus, em primeiro lugar, por me guiar e fortalecer ao longo dessa jornada. Agradeço imensamente aos meus pais, Genessi José da Costa e Antonia Aparecida Mendes, por me apoiarem incondicionalmente na decisão de cursar uma nova graduação. Sem o incentivo e o suporte deles, esse sonho não teria sido possível.

Agradeço também à minha irmã, Gessica Mendes da Costa, que foi minha companheira desde o início desta caminhada na Agronomia. Juntas, decidimos iniciar esse curso, e juntas estamos realizando um sonho que há muito tempo almejamos concretizar.

Meu primo, Jeviny Lopes Mendes, merece um agradecimento especial. Ele sempre esteve ao meu lado, oferecendo apoio e conselhos valiosos nos momentos em que enfrentei desafios durante meus estudos. Sua presença foi fundamental para me manter motivada.

Sou igualmente grata ao pessoal do grupo de pesquisa do Laboratório de Estudos Aplicados em Fisiologia Vegetal (LEAFv). Em especial, agradeço à Sabrina Emanuella da Silva Almeida, com quem tive a oportunidade de trabalhar e compartilhar experiências enriquecedoras, e à Leticia Ferreira de Sousa minha orientadora, que me ofereceu todo o suporte e orientação durante minha Iniciação Científica e no desenvolvimento do meu Trabalho de Conclusão de Curso.

Minha sincera gratidão à minha professora e coorientadora, Dra. Fernanda dos Santos Farnese, por seus ensinamentos, paciência e por me acolher de braços abertos no laboratório LEAFv. O tempo que passei desenvolvendo pesquisas sob sua orientação foi de inestimável valor para meu crescimento acadêmico e pessoal.

Por fim, agradeço ao Instituto Federal Goiano e a todos os meus professores pela qualidade de ensino, dedicação, paciência e pelos ensinamentos compartilhados. Cada um deles, sem exceção, teve um papel crucial no meu desenvolvimento pessoal e profissional. Agradeço, também, a todos que, de alguma forma, contribuíram para a execução deste trabalho e para minha formação.

RESUMO

COSTA, Andréia Mendes da. ***Bacillus haynessi*, *B. aryabhatai* e *B. circulans* como aliados na atenuação do estresse hídrico em plantas de milho (*Zea mays* L.)**. 2025. 62p. Monografia (Curso Bacharelado de Agronomia). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde, Rio Verde, GO, 2025.

A seca é um importante estresse abiótico que afeta o desenvolvimento e a produção de muitas culturas agrícolas, principalmente do milho (*Zea mays* L.). Vários estudos sobre microrganismos atuando sobre a tolerância à seca em condições de déficit hídrico (DH) têm sido realizados; no entanto, até onde foi possível constatar, não há produto contendo essas três espécies do gênero *Bacillus* envolvidas na mitigação de danos desencadeados pelo DH, principalmente nos mecanismos de proteção às células foliares contra o estresse hídrico. Portanto, o objetivo deste estudo foi avaliar como o ativador microbiológico (bioinsumo) contendo *Bacillus haynessi*, *B. aryabhatai* e *B. circulans* influencia a fisiologia e as relações hídricas de plantas de milho em resposta à seca. O experimento foi conduzido no IF Goiano, Campus Rio Verde, onde sementes de milho foram semeadas e mantidas na capacidade de campo (CC) até o estágio V8, sendo então submetidas a dois regimes hídricos (irrigação plena ou déficit hídrico) e tratadas (inoculadas) com bactérias em diferentes momentos do período de seca. O delineamento *Zea mays* L. experimental foi inteiramente ao acaso (DIC), com cinco repetições e sete tratamentos, os quais incluíram: T1: CT (Controle); T2: DH (Déficit hídrico); T3: DH + AS (ativador microbiológico na semente); T4: DH + AS + AF (pré_120h) (pré-tratamento foliar com aplicação antes da seca); T5: DH + AS + AF (pré_48h) (ativador na folha aplicado dois dias após o início da seca); T6: DH + AS + AF (pré_72h) (ativador na folha aplicado três dias após a seca); T7: DH + AS + AF (pré_120h) (ativador na folha aplicado cinco dias após o início da seca). No décimo dia de seca avaliou-se o potencial hídrico, teor de água, trocas gasosas, índices de clorofilas, extravasamento de eletrólitos e biomassa. A seca afetou negativamente a fisiologia das plantas, mas a adição das bactérias melhorou o status hídrico, promoveu a manutenção da fotossíntese e a integridade das membranas, sendo mais expressivos no pré-tratamento foliar (120h antes do início da seca).

Palavras-chave: Mudanças climáticas, déficit hídrico, ativador microbiológico (bioinsumo), tolerância ao estresse abiótico, milho.

LISTA DE ABREVIACOES E SÍMBOLOS

CT	Controle
DH	Déficit hídrico
AT	Ativador microbiológico nas sementes
AF	Ativador microbiológico nas folhas
C ₄	Plantas com metabolismo C ₄
C ₃	Plantas com metabolismo C ₃
MO	Matéria orgânica
A	Taxa de assimilação líquida do carbono
<i>g_s</i>	Condutância estomática
<i>E</i>	Taxa transpiratória
<i>C_i/C_a</i>	Concentração interna e externa de CO ₂
Ψ_{md}	Potencial hídrico foliar
TEE	Taxa de extravasamento de eletrólitos
TRA – folha	Teor relativo de água da folha
TA – caule	Teor de água do caule
TA – raiz	Teor de água da raiz
Ca	Cálcio
Mg	Magnésio
Al	Alumínio
H+Al	Hidrognio mais alumínio
SB	Soma de bases
CTC	Capacidade de troca catinica
P	Fósforo
S	Enxofre
K	Potássio
m	Saturação por alumínio
V	Saturação de bases
B	Boro

Zn	Zinco
Cu	Cobre
Mn	Manganês
Fe	Ferro
pH	Potencial hidrogeniônico

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema gráfico dos tratamentos aplicados em plantas de milho: controle, déficit hídrico, e aplicação de ativador microbiológico nas sementes e folhas, antes e durante 23

Figura 2. Potencial hídrico foliar ao meio-dia (Ψ_{md}), teor relativo de água na folha (TRA_{folha}) e teores de água no caule (TA_{caule}) e na raiz (TA_{raiz}) em plantas de milho (*Zea mays*), continuamente irrigadas e expostas à seca, tratadas com *Bacillus aryabhattai*, *B. circulans* e *B. haynesii*. **T1:** Controle (CT); **T2:** Déficit hídrico (DH); **T3:** DH + AS (ativador na semente); **T4:** DH + AS + AF(pré_120h) (ativador na semente e pré-tratamento foliar, com aplicação do ativador na folha antes da seca); **T5:** DH + AS + AF(pré_48h) (ativador na semente e ativador na folha, aplicado dois dias após o início da seca); **T6:** DH + AS + AF(pré_72h) (ativador na semente e ativador na folha, aplicado três dias após o início da seca); **T7:** DH + AS + AF(pré_120h) (ativador na semente e ativador na folha, aplicado cinco dias após o início da seca). Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si (teste SNK, $p \leq 0,05$) 27

Figura 3. Taxa de extravasamento de eletrólitos (TEE) em plantas de milho (*Zea mays*), continuamente irrigadas e expostas à seca, tratadas com *Bacillus aryabhattai*, *B. circulans* e *B. haynesii*. **T1:** Controle (CT); **T2:** Déficit hídrico (DH); **T3:** DH + AS (ativador na semente); **T4:** DH + AS + AF(pré_120h) (ativador na semente e pré-tratamento foliar, com aplicação do ativador na folha antes da seca); **T5:** DH + AS + AF(pré_48h) (ativador na semente e ativador na folha, aplicado dois dias após o início da seca); **T6:** DH + AS + AF(pré_72h) (ativador na semente e ativador na folha, aplicado três dias após o início da seca); **T7:** DH + AS + AF(pré_120h) (ativador na semente e ativador na folha, aplicado cinco dias após o início da seca). Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si (teste SNK, $p \leq 0,05$) 28

Figura 4. Índice de clorofila *a*, índice de clorofila *b* e área foliar em plantas de milho (*Zea mays*), continuamente irrigadas e expostas à seca, tratadas com *Bacillus aryabhattai*, *B. circulans* e *B. haynesii*. **T1:** Controle (CT); **T2:** Déficit hídrico (DH); **T3:** DH + AS (ativador na semente); **T4:** DH + AS + AF(pré_120h) (ativador na semente e pré-tratamento foliar, com aplicação do ativador na folha antes da seca); **T5:** DH + AS + AF(pré_48h) (ativador na semente e ativador na folha, aplicado dois dias após o início da seca); **T6:** DH + AS + AF(pré_72h) (ativador na semente e ativador na folha, aplicado três dias após o início da seca); **T7:** DH + AS + AF(pré_120h) (ativador na semente e ativador na folha, aplicado cinco dias após o início da seca). Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si (teste SNK, $p \leq 0,05$) 29

Figura 5. Taxa de assimilação líquida do carbono (*A*), condutância estomática (g_s), taxa transpiratória (*E*), concentração interna e externa de CO₂ (*C_i/C_a*), eficiência de carboxilação (*A/C_i*) e eficiência no uso da água (EUA) em plantas de milho (*Zea mays*), continuamente irrigadas e expostas à seca, tratadas com *Bacillus aryabhattai*, *B. circulans* e *B. haynesii*. **T1:** Controle (CT); **T2:** Déficit hídrico (DH); **T3:** DH + AS (ativador na semente); **T4:** DH + AS + AF(pré_120h) (ativador na semente e pré-tratamento foliar, com aplicação do ativador na folha antes da seca); **T5:** DH + AS + AF(pré_48h) (ativador na semente e ativador na folha, aplicado dois dias após o início da seca); **T6:** DH + AS + AF(pré_72h) (ativador na semente e ativador na folha, aplicado três dias após o início da seca); **T7:** DH + AS + AF(pré_120h) (ativador na semente e ativador na folha, aplicado cinco dias após o início da seca). Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si (teste SNK, $p \leq 0,05$) 30

Figura 6. Massa de folhas (MSF), caule (MSC), parte aérea (MSPA), raiz (MSR) e massa total (MST) em plantas de milho (*Zea mays*), continuamente irrigadas e expostas à seca, tratadas com *Bacillus aryabhattai*, *B. circulans* e *B. haynesii*. No experimento, foram aplicados sete tratamentos distintos: **T1:** Controle (CT); **T2:** Déficit hídrico (DH); **T3:** DH + AS (ativador na semente); **T4:** DH + AS + AF(pré_120h) (ativador na semente e pré-tratamento foliar, com aplicação do ativador na folha antes da seca); **T5:** DH + AS + AF(pré_48h) (ativador na semente

e ativador na folha, aplicado dois dias após o início da seca); **T6:** DH + AS + AF(pré_72h) (ativador na semente e ativador na folha, aplicado três dias após o início da seca); **T7:** DH + AS + AF(pré_120h) (ativador na semente e ativador na folha, aplicado cinco dias após o início da seca). Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si (teste SNK, $p \leq 0,05$) 32

LISTA DE TABELA

Tabela 1. Resultado da caracterização físico-química do solo em sua condição natural.	21
---	----

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	8
2 REVISÃO DE LITERATURA	11
2.1 A crise climática e o futuro da agricultura	11
2.2 Respostas das plantas ao estresse hídrico e estratégias de adaptação	13
2.3 Mecanismos de ação do <i>Bacillus haynesii</i>	16
2.4 Mecanismos de ação do <i>Bacillus circulans</i>	18
2.5 Mecanismos de ação do <i>Bacillus aryabhatai</i>	19
2.6 Produtos biológicos: Estratégias de gestão para melhorar a tolerância e o desempenho à seca no campo	19
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	21
3.1 Condições de cultivo	21
3.2. Aplicação dos tratamentos	22
3.3 Potenciais hídrico da folha e teor relativo de água	24
3.4 Trocas gasosas, índice de clorofilas e área foliar	25
3.4 Extravasamento de eletrólitos	26
3.5 Massa seca de folhas, caule e raiz.....	26
3.6 Análise estatística.....	26
4 RESULTADOS	27
5 DISCUSSÃO.....	35
5.1 Os ativadores microbiológicos (bioinsumos) alteram as propriedades hidráulicas de milho em condições de seca?	35
5.2 Influência do tempo de aplicação de ativadores microbiológicos na proteção das membranas de milho sob restrição hídrica no solo	37
5.3 Efeito do ativador microbiológico do gênero <i>Bacillus</i> nos principais aspectos fisiológicos e produção de biomassa.....	38
6 CONCLUSÃO.....	41
7 REFERÊNCIAS	41

1 INTRODUÇÃO

O aquecimento global é um dos principais impulsionadores das mudanças climáticas, promovendo um aumento constante na temperatura média global. Esse fenômeno influencia diretamente os regimes hídricos, alterando padrões de precipitação e disponibilidade de água. Como consequência, prevê-se um crescimento na frequência e intensidade dos períodos de seca, impactando significativamente o balanço hídrico e comprometendo ecossistemas, atividades agrícolas e o abastecimento em diversas regiões do planeta (Dai, 2012; Trenberth et al., 2014). A seca, por si só, tem desencadeado perdas substanciais, tanto econômicas, como sociais e ambientais (Kavamura et al., 2013). Espera-se que os efeitos deletérios induzidos por esse estresse se intensifiquem nos próximos anos (Morita; Nakićenović; Robinson, 2000; IPCC, 2022). Essa intensificação é particularmente preocupante, uma vez que os impactos decorrentes da seca são considerados um dos principais desastres naturais do mundo, tendo em vista que aproximadamente 1,4 milhões de pessoas estão diretamente envolvidas na agricultura, de forma que a restrição hídrica não só ameaça uma parte significativa da subsistência dessas populações, mas também compromete o desenvolvimento econômico do país, assim como a segurança alimentar e energética (Cunha et al. 2019; Meza et al. 2020; Silva et al., 2023a).

De fato, a seca gera impactos substanciais, que não se limitam apenas aos fatores econômicos e sociais citados, mas também impactam os aspectos ambientais. Essa situação vem se intensificando devido aos desafios climáticos globais e à crescente pressão sobre os recursos hídricos (Alves et al., 2021). Se não forem geridos adequadamente, podem levar à redução ou perda de serviços ecossistêmicos essenciais (Mengue et al., 2020). Esses efeitos decorrem do desenvolvimento socioeconômico e da globalização mundial. Um exemplo disso é o uso intensivo de sistemas de irrigação (Giri e Qiu, 2016), que tem levado à extração excessiva de águas superficiais e subterrâneas, levantando preocupações quanto à sua sustentabilidade a longo prazo. À medida que os agricultores recorrem e dependem cada vez mais da irrigação, surgem questionamentos sobre a viabilidade dessa estratégia agrícola (Silva, 2023b), que pode levar ao assoreamento de canais, rios e reservatórios e, na pior das hipóteses, ao esgotamento dos aquíferos (Mengue et al., 2020). Isso ocorre em razão de práticas inadequadas associadas aos sistemas de irrigação, que levam ao esgotamento dos recursos hídricos. Além de reduzir a disponibilidade hídrica, o uso excessivo de fertilizantes químicos e pesticidas pode

comprometer a qualidade do solo. Nesse sentido, as ações antrópicas na natureza ao longo dos anos têm provocado séries de desequilíbrios ambientais, incluindo a intensificação nos eventos de seca, principal estresse abiótico que resulta em perdas na produtividade (Ahluwalia; Singh; Bhatia, 2021).

Segundo o levantamento da Conab, a produção de grãos para a safra 2024/2025 deve atingir 322,47 milhões de toneladas. Com uma estimativa de 119,74 milhões de toneladas, a produção de milho apresentou uma leve recuperação em relação ao ciclo anterior; contudo, registrou-se uma redução de 1,1% na produção e de 5,4% na área cultivada. Essa diminuição na produção é um reflexo das condições climáticas adversas que têm impactado as principais regiões produtoras do país. No Sul, os altos índices pluviométricos foram um problema, enquanto no Centro-Oeste brasileiro, a combinação de altas temperaturas e baixos índices pluviométricos provocaram atraso e perda da janela de plantio na entressafra (Gonzaga Filho e Silva, 2023).

Essas adversidades climáticas impactam diretamente o milho (*Zea mays*), embora seja tolerante a uma ampla faixa de temperaturas, ele é sensível ao estresse hídrico do solo (Martins et al., 2018; Silva, 2023a), especialmente quando a planta atinge o estágio de desenvolvimento em que a 8ª folha é emitida (Chen et al., 2010; Hussain et al., 2019). A seca, por si só, tem levado os produtores a enfrentar incertezas, o que, sem dúvida, dificulta a tomada de decisões frente às mudanças climáticas (Ahluwalia; Singh; Bhatia, 2021), e representa um grande desafio e complica ainda mais a gestão e a sustentabilidade das práticas agrícolas. Dado à crescente probabilidade de que os eventos de seca se tornem mais intensos e, portanto, mais prejudiciais nos próximos anos, torna-se necessário investigar estratégias para mitigar ou, pelo menos, tolerar os efeitos deletérios induzidos pela restrição hídrica (Jaborova et al., 2022; Rasheed et al., 2022).

O grande impacto do déficit hídrico sobre a produtividade das lavouras deve-se ao efeito direto na atividade fotossintética (Anjum et al., 2011). A restrição hídrica no solo induz ao fechamento estomático, a fim de evitar a perda de água por transpiração, o que limita a absorção de dióxido de carbono (CO₂) e a sua fixação na enzima Rubisco, que por sua vez diminui a taxa fotossintética. As limitações bioquímicas da Rubisco vão se agravando à medida que a seca se intensifica, resultando na queda da produção de carboidratos essenciais para o

crescimento das plantas (Efeoğlu; Ekmekçi; Çiçek, 2009; Perdomo et al., 2017). As respostas à seca são múltiplas e interconectadas, além das acima citadas outras respostas são observadas como, o enrolamento das folhas, redução do turgor celular, diminuição dos conteúdos de clorofila, absorção de nutrientes e falha hidráulica dos vasos do xilema ocasionada, principalmente, pela ocorrência do embolismo (Efeoğlu; Ekmekçi; Çiçek, 2009; Zhang et al., 2018a; Islam et al., 2019). Todos esses fatores em conjunto reduzem a eficiência do uso da água e impactam diretamente o rendimento das lavouras (Hussain et al., 2019).

Tecnologias agrícolas capazes de diminuir os danos causados pela seca, sem que ocorra a exaustão dos recursos hídricos, são cada vez mais necessárias. Nesse sentido, destaca-se a utilização de microrganismos benéficos, como bactérias e fungos, que promovem o crescimento das plantas, melhoram a eficiência no uso da água, aumentam a absorção de nutrientes e estimulam mecanismos de defesa (Silva, et al., 2023a). Dentre esses microrganismos estudados, as bactérias do gênero *Bacillus*, como *Bacillus haynesii*, *Bacillus circulans* e *Bacillus aryabhatai*, têm mostrado grande potencial no crescimento e desenvolvimento das plantas (Saxena et al., 2020; Maheshwari et al., 2022; Fuga et al., 2023), estimulando a biossolubilização de fósforo (Ramesh et al., 2014a; Mehta et al., 2015; Abdelgalil et al., 2022) e atenuação dos efeitos negativos do estresse salino (Mehmood et al., 2012; Latef et al., 2020; Sahu et al., 2021; Reang et al., 2022; Ali et al., 2024). Diante das oscilações climáticas em curso, até onde foi possível constatar, não há estudos que avaliem os efeitos da ação conjunta das três espécies do gênero *Bacillus* na mitigação do estresse hídrico.

Com base no exposto, testou-se as seguintes hipóteses: (i) a junção das bactérias *Bacillus haynesii*, *Bacillus circulans* e *Bacillus aryabhatai*, ajudará a mitigar os efeitos nocivos do déficit hídrico nos principais aspectos fisiológicos em plantas de milho; (ii) Plantas de milho em déficit hídrico e não tratadas com as bactérias apresentarão impactos negativos nas relações hídricas, na atividade fotossintética e na produção de biomassa.

Para testar as hipóteses, o presente estudo teve como objetivo explorar os padrões de alocação de biomassa de folhas, caule e raiz, eficiência fotossintética e relações hídricas em plantas de milho submetidas à seca com ou sem tratamento com *Bacillus haynesii*, *B. aryabhatai* e *B. circulans*, a fim de identificar as possíveis estratégias de tolerância e prevenção de danos em membrana celulares.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A crise climática e o futuro da agricultura

As mudanças climáticas e o crescimento populacional têm aumentado a pressão sobre a disponibilidade de alimentos, e espera-se que, em um futuro próximo, esses fatores causem impactos ainda mais severos, levando à escassez de alimento (Serna, 2022), conforme apontado por relatórios climáticos (IPCC, 2022). Essas questões, agora uma realidade, vêm preocupando a comunidade global. A seca, intensificada pela restrição de chuvas, é um dos desafios críticos que necessitam de pesquisas urgentes para encontrar estratégias que possam solucionar ou, ao menos, mitigar esses problemas decorrentes das mudanças climáticas. Como resultado, a influência das mudanças climáticas afetará diversas culturas, incluindo o milho (*Zea mays*). A intensificação desses eventos de seca, tanto em severidade quanto em frequência, está ocorrendo globalmente e espera-se que continue a aumentar, o que pode levar ao declínio da agricultura em mais da metade das terras aráveis até 2050 (Kasim et al., 2013). Este impacto será ainda mais pronunciado à medida que a população global cresce, projetando-se para mais de 9,7 bilhões até 2050 (Adam, 2021). Com mais de 65% dos indivíduos dependendo exclusivamente da agricultura para sua subsistência, não só a economia do país, mas também o seu suprimento de alimentos dependerá fortemente da agricultura (Ahluwalia; Singh; Bhatia, 2021). Diante desse cenário, é imperativo encontrar soluções para o cultivo de culturas agrícolas, como o uso de biotecnologias, incluindo microrganismos, que atuam na tolerância ao déficit hídrico (DH) (Gregersen et al., 2013; Zia et al., 2021).

Diante do aumento da pressão sobre a disponibilidade de alimentos devido às mudanças climáticas e ao crescimento populacional, a produção agrícola, particularmente do milho, está prevista para enfrentar desafios significativos. Esse cenário é ainda mais alarmante quando se considera que 50% das perdas de safra são causadas por estresses abióticos, como a seca (Kajla et al., 2015; Zia et al., 2021). E entre essas perdas, 10% estão relacionadas à seca, 20% ao estresse térmico e o restante a outros agentes estressores. A interação de múltiplos estresses abióticos, como o calor intenso combinado com a seca severa, destaca a importância de desenvolver estratégias para aumentar a tolerância das plantas em campo. Isso inclui aumentar as respostas morfofisiológicas para que as plantas possam sobreviver e manter a

produtividade sob condições adversas (Claeys e Inzé, 2013).

Considerando as projeções de alterações na precipitação e na temperatura, que são responsáveis por grande parte das perdas enfrentadas pelos produtores rurais. O milho, apesar de sua capacidade de tolerar uma ampla variação de temperaturas, mostra-se particularmente vulnerável ao estresse hídrico no solo (Martins et al., 2018; Silva, 2023a). Essas projeções indicam que, até 2050, o rendimento do milho poderá sofrer uma redução de 39% a 68% em comparação com o período de 2013 a 2017, dependendo do cenário climático considerado (Webber et al., 2018; Yu; Miao; Khanna, 2021; Serna, 2022). Complementando essas estimativas, o estresse hídrico tem sido apontado como responsável por uma queda de 40% na produção global de milho, como consequência direta da escassez hídrica (Bouremani et al., 2023). Esses dados, portanto, ressaltam a gravidade do desafio tanto para a comunidade científica, na busca por soluções, quanto para as empresas, que precisam desenvolver alternativas para melhorar a produtividade no campo. Diante desse cenário alarmante, a seguir, exploraremos aspectos gerais do milho e sua relevância para a segurança alimentar global, destacando a necessidade urgente de estratégias para enfrentar esses desafios e garantir a sustentabilidade da produção agrícola.

Com a maior produção entre os cereais, o milho é cultivado em diversas partes do mundo (Kaboosi et al., 2023). Esse cereal se destaca pelo seu elevado rendimento e desempenha um papel essencial na alimentação global, servindo como principal alimento básico para a população. Além de seu uso alimentar, o milho é importante para a produção de etanol e é utilizado como silagem para a alimentação animal (Martins et al., 2018). Atualmente, 61% da produção global de milho é destinada à ração para o gado, enquanto 13% é consumida diretamente pelos seres humanos, com uma produção total de grãos que ultrapassa 1,1 bilhão de toneladas. Pertencente à família das gramíneas *Poaceae*, que inclui mais de 10.000 espécies, domesticado a partir do teosinto (*Zea mays* ssp. *parviglumis*) (Serna, 2022). Como uma planta C₄, o milho enfrenta desafios significativos relacionados ao estresse hídrico e à seca, com sua sensibilidade a essas condições reduzindo severamente seu crescimento e rendimento (Daryanto; Wang; Jacinthe, 2016). O milho, por ser uma planta C₄, possui maior eficiência no uso da água em comparação com as plantas C₃. Isso se deve à sua anatomia funcional, que é mais evoluída e permite uma concentração mais eficiente de dióxido de carbono (CO₂) nas

células, otimizando o processo fotossintético. Apesar de seu funcionamento estomático permitir que as plantas C₄, como o milho, sejam geralmente mais tolerantes à seca do que as C₃ (Santana et al., 2023), elas ainda podem ser suscetíveis aos efeitos da seca, dependendo da intensidade e da duração da exposição (Da Costa Neto, 2023; Ahluwalia; Singh; Bhatia, 2021). Ahluwalia, Singh e Bhatia (2021), ressaltam ainda que, para as culturas de cereais, a seca continua sendo o principal estresse abiótico que compromete seu rendimento.

Como o déficit hídrico afeta negativamente a fisiologia das plantas, a aplicação de microrganismos benéficos, como *Bacillus haynesii*, *Bacillus aryabhattai* e *Bacillus circulans*, nas sementes e/ou nas folhas pode melhorar a performance das plantas no campo e aumentar sua tolerância à restrição hídrica? Com base nas previsões climáticas e na literatura especializada, discutida por autores como Adam (2021), Ahluwalia, Singh e Bhatia (2021), Zia et al. (2021) e Serna (2022), é provável que habitaremos um planeta com temperaturas de 4° a 5° graus mais quentes, o que impactará diretamente o setor agrícola, como já está acontecendo no Brasil Central, onde as chuvas diminuíram em comparação com 10-20 anos atrás. Essa redução torna a produção de alimentos ainda mais alarmante (Gonzaga Filho e Silva, 2023; Silva, 2023a). Como podemos garantir a alimentação de quase 10 bilhões de indivíduos em um contexto onde a produção agrícola já é prejudicada pela escassez de chuvas? Nesse cenário, torna-se crucial explorar alternativas para aumentar a produtividade no campo. Uma das soluções apresentadas neste estudo envolve o uso de microrganismos benéficos para ajudar as plantas de milho a se adaptarem às novas condições impostas pelas mudanças climáticas. Essas adaptações devem incluir não apenas melhorias tecnológicas, mas também biológicas, como o aumento da tolerância das plantas à seca.

2.2 Respostas das plantas ao estresse hídrico e estratégias de adaptação

A seca, sendo um dos principais estresses abióticos que limita o crescimento e o rendimento de culturas como o milho, conforme discutido anteriormente e abordado neste tópico, representa não apenas um grande obstáculo, mas também um problema recorrente enfrentado pelos agricultores todos os anos (Serna, 2022). Devido à sua natureza recorrente e à dificuldade de monitoramento, a seca não se restringe a uma região ou período específicos, o

que complica ainda mais sua gestão (Salehi-Lisar e Bakhshayeshan-Agdam, 2016). Complementarmente, ela é agravada por práticas agrícolas inadequadas, como uso intensivo de sistema de irrigação sem o manejo adequado dos recursos hídricos. Essas práticas podem causar o assoreamento dos corpos d'água, como canais, rios e reservatórios, além de contribuir para o esgotamento dos aquíferos, consequência do desenvolvimento socioeconômico e da globalização mundial (Giri e Qiu, 2016), junto com o uso excessivo de fertilizantes químicos e pesticidas, resultam em solos impróprios e aumentam a degradação do solo (Claeys e Inzé, 2013). Além dos obstáculos mencionados, importantes culturas enfrentam diversas condições estressantes. É por essa razão que o estresse abiótico se destaca como o principal responsável pela perda da produtividade (Ahluwalia; Singh; Bhatia, 2021).

Em adição a esses desafios, é importante destacar que a seca pode variar de moderada a severa e pode se prolongar por longos períodos. Episódios de veranico são especialmente prejudiciais devido à redução da disponibilidade hídrica em momentos críticos do ciclo da planta. Caracterizada pela ausência de chuvas significativas, o que limita a disponibilidade de água para o crescimento e desenvolvimento das plantas, a seca, além disso, está associada ao estresse oxidativo e ao impedimento mecânico à penetração das raízes em solos compactados e secos, alterando a morfologia e a fisiologia das plantas. Dentre todos os estresses abióticos em conjunto, a seca tem o efeito significativo na biota do solo e nas plantas (Zia et al., 2021). Como resultado da persistência desse estresse, bem como de seus efeitos, podem ocorrer danos irreversíveis e permanentes, manifestando-se em crescimento atrofiado, comprometimento do metabolismo e redução no rendimento de grãos (Bhat et al., 2020; Ahluwalia; Singh; Bhatia, 2021).

De fato, as plantas apresentam crescimento reduzido quando impostas ao estresse hídrico (Fahad et al., 2017). Com efeito, é possível observar um menor teor de água nos tecidos, baixo turgor celular e uma queda na taxa transpiratória. Se a exposição prolongada à seca persistir, compromete diversas funções celulares, incluindo a atividade das membranas. Consequentemente, a redução da pressão de turgor leva à diminuição da área foliar total, enquanto a menor disponibilidade de água reduz a atividade fotossintética. Como resultado a essas mudanças, os estômatos se fecham, uma resposta adaptativa de “escape/fuga” para minimizar a perda de água, o que também diminui a fotossíntese e prejudica ainda mais o

desenvolvimento das plantas. Essa influência é particularmente crítica durante o estágio vegetativo inicial, onde o déficit hídrico inibe a expansão celular. Nessa fase, os efeitos da restrição hídrica tornam-se ainda mais proeminentes para a altura de planta e biomassa fresca e seca, tanto da parte aérea quanto das raízes, sob condições de seca de intensidade moderada a severa. Já o estágio reprodutivo é a fase mais sensível das plantas, pois a disponibilidade de água afeta diretamente a formação de flores, a viabilidade do pólen e o enchimento de grãos, o que impacta a produção e compromete significativamente o rendimento das culturas (Zia et al., 2021; Giordano; Petropoulos; Rouphael, 2021; Santos et al., 2022).

As plantas ajustam o crescimento e a sobrevivência em condições de limitação hídrica, incluindo as respostas adaptativas, implicações e estratégias em um conceito denominado “agonia da escolha” (Claeys e Inzé, 2013). Durante a ocorrência de limitação hídrica, os mecanismos de tolerância e evitação do estresse são ativados para garantir a sobrevivência, especialmente se o estresse persistir ou se intensificar, o que pode resultar em uma limitação do crescimento e, conseqüentemente, em uma desvantagem competitiva. Contudo, as plantas possuem adaptações que permitem equilibrar a sobrevivência com o crescimento contínuo, dependendo do nível de estresse (Muller et al., 2011). O crescimento, em particular, é mais sensível à limitação hídrica do que a fotossíntese, o que muitas vezes leva ao acúmulo de carboidratos em plantas sob estresse, indicando que a redução do crescimento não é consequência do déficit de carbono. Enquanto os tecidos em crescimento reprogramam ativamente e ajustam seu crescimento, eles também ativam mecanismos de tolerância para proteger contra danos celulares (Claeys e Inzé, 2013).

As plantas exibem padrões de desenvolvimento oportunistas, alternando entre crescimento e dormência em resposta a sinais externos, além do equilíbrio cuidadoso de sobrevivência através de mecanismos de quiescência e tolerância (Eljebbawi, 2024). Os termos dormência e quiescência “descansar” definem parada temporária no crescimento e no metabolismo, garantindo a sobrevivência da planta ao sincronizar seus processos de desenvolvimento com o ambiente (Eljebbawi, 2024). Isso resulta em uma correlação estreita entre ambos os processos, refletindo a necessidade de um balanço preciso para garantir tanto a sobrevivência quanto o desenvolvimento em ambientes desfavoráveis (Claeys e Inzé, 2013).

A correlação estreita entre os processos de quiescência e tolerância ao crescimento

reflete a adaptabilidade das plantas em ambientes desafiadores. Quando expostas à seca severa, as plantas podem entrar em um estado quiescência de suspensão parcial de funções vitais, reduzindo sua taxa de crescimento e limitando a produção de novas folhas até que as condições melhorem e permitir a retomada do crescimento (Considine e Considine, 2016). Em paralelo, a tolerância ao crescimento envolve a adaptação metabólica e estrutural de uma planta, permitindo que ela cresça mesmo sob estresse, usando recursos de forma mais eficiente para minimizar a perda de água (Ahluwalia; Singh; Bhatia, 2021). Dessa forma, as plantas conseguem seguir “um caminho tranquilo para a longevidade”, equilibrando cuidadosamente a sobrevivência e o crescimento contínuo (Heyman; Kumpf; de Veylder, 2014).

Neste contexto de adaptação das plantas a condições de estresse, torna-se imperativo investigar os potenciais efeitos dos microrganismos, especialmente as bactérias do gênero *Bacillus*, que emergem como uma alternativa eficaz para enfrentar os desafios da seca e ajudar a melhorar a produtividade das culturas. Diversos trabalhos têm avaliado o potencial de espécies como *Bacillus haynesii*, *Bacillus circulans* e *Bacillus aryabhatai*, cujas características e efeitos benéficos sobre o crescimento vegetal, biorremediação, biocontrole e biossolubilização, entre outros, serão discutidos nos tópicos a seguir, com uma análise detalhada das funções e contribuições de cada microrganismo.

2.3 Mecanismos de ação do *Bacillus haynesii*

O *Bacillus haynesii*, destaca-se por ser uma bactéria anaeróbia facultativa, Gram-positiva e formadora de endósporos (Singh e Hiranmai, 2021). Segundo Maurya et al. (2022), essa espécie de *Bacillus* atuou como agente de biorremediação, no qual os autores observaram um aumento na formação de biofilme e na produção de substâncias poliméricas extracelulares durante o processo de quelação do cromo hexavalente [Cr(VI)], o que levou à sua redução. Esses resultados reforçam o papel crucial desses mecanismos na remoção de metais pesados, demonstrando sua capacidade de persistir e até mesmo sobreviver em áreas contaminadas, ao mesmo tempo, que utilizam esses metais para seu próprio crescimento.

O *B. haynesii* é classificado como uma bactéria termofílica, adaptada a ambientes de alta temperatura (Rehman et al., 2019; Singh e Hiranmai, 2021). Também possui características halofílica e halotolerante capazes de crescer independentemente da presença ou ausência de sal

e é capaz de tolerar concentrações relativamente altas de cloreto de sódio (NaCl). Essa adaptação a ambientes salinos ajuda a equilibrar a pressão osmótica e a resistir aos efeitos desnaturantes dos sais, mitigando assim o estresse osmótico (Reang et al., 2022). Corroborando com este estudo, Patel, Vurukonda e Patel (2023), observaram que a exposição de plantas de *Amaranthus viridis* a altas concentrações de sal favoreceu seu crescimento em condições in vitro. A pesquisa de Gupta et al. (2023), complementando esses achados, demonstrou que *B. haynesii* promoveu alívio da salinidade e redução do estresse oxidativo em duas cultivares de arroz.

Sahu et al. (2021), avaliou os efeitos da inoculação de *B. haynesii* em plantas de tomate cultivadas em solos de alta salinidade, com foco no balanço da relação do sódio-potássio (Na^+/K^+), estresse oxidativo e arquitetura radicular. A atividade da superóxido dismutase (SOD) e os níveis de peroxidase do ascorbato (APX) e catalase (CAT), resultando na mitigação do estresse oxidativo. As plantas tratadas com *B. haynesii* reduziram o acúmulo de peróxido de hidrogênio (H_2O_2) induzido pela salinidade e diminuiu o transporte de Na^+ , contribuindo para o melhor desempenho das plantas, além de apresentar sinais reduzidos de morte celular programada. Apesar de não impactar a arquitetura das raízes, a inoculação de *B. haynesii* favoreceu a superexpressão de genes relacionados ao equilíbrio iônico e à sinalização de estresse. Esses achados sugerem que *B. haynesii* pode modular a maquinaria antioxidante e o equilíbrio iônico das plantas, promovendo crescimento e produtividade em áreas salinas. Nesse contexto, o estudo de Maheshwari et al. (2022) destacou *B. haynesii* como uma bactéria promotora do crescimento em plantas de ervilha (*Pisum sativum*) e grão-de-bico (*Cicer arietinum*).

No estudo de Mishra et al. (2023) observou-se que *B. haynesii* possui capacidade de biocontrole contra patógenos do gênero *Fusarium* em leguminosas, como grão-de-bico, lentilha e feijão-guandu, resultando em uma redução significativa no crescimento micelial de todos os patógenos responsáveis pela murcha. Além disso, houve aumento na produção de fosfatase, uma enzima promotora do crescimento vegetal, assim como de ácido indolacético (AIA) e sideróforos, componentes importantes para o desenvolvimento das plantas (Mishra et al., 2023). Sahu et al. (2020) também demonstraram que *B. haynesii* modula a promoção do crescimento em plantas de arroz (*Oryza sativa* L.) e induz resistência sistêmica contra *Rhizoctonia solani*.

Essas evidências destacam o potencial de *B. haynesii* tanto para estimular o crescimento das plantas quanto para proteger contra doenças fúngicas em diferentes culturas.

Outros estudos que avaliaram a ação do *B. haynesii* corroboram seus efeitos benéficos sobre o crescimento vegetal. Abdelgalil et al. (2022) destacaram o aumento na produção de ácido láctico, seguido por ácido glutâmico e pelo isômero do ácido hidroxibenzóico. Esses compostos foram responsáveis por estimular a produção de fosfatase ácida e a biossolubilização de fosfato de rocha. Já Abdel-Hamid et al. (2021) observaram que plantas de tomilho (*Thymus vulgaris*) apresentaram aumento na solubilização de fosfato e fixação de nitrogênio, processos esses atribuídos à ação do *B. haynesii*, resultando na promoção do crescimento vegetal.

2.4 Mecanismos de ação do *Bacillus circulans*

A ação do *Bacillus circulans* na solubilização de fósforo (P) favorece a promoção do crescimento de plantas, com a produção de auxinas, ACC desaminase e sideróforos (Saxena et al., 2020). Nesse contexto, o estudo realizado por Mehta et al. (2015) evidenciou que a inoculação com esse microrganismo resultou em um aumento na germinação de sementes, assim como no comprimento e no peso seco do broto e da raiz. Além disso, observou-se um incremento nos teores de nitrogênio, fósforo e potássio na biomassa do broto. Esses resultados foram associados à liberação de ácidos orgânicos, sendo o ácido glucônico e o ácido cítrico os principais responsáveis nesse processo. Com isso, o isolado de *B. circulans* apresentou atributos promissores como solubilizador de P e promotor do crescimento em plantas de tomate, podendo ser desenvolvido como um biofertilizante para aumentar a fertilidade do solo e favorecer o crescimento das plantas (Mehta et al., 2015).

Adicionalmente, Latef et al. (2020) relataram que a inoculação com *B. circulans* mitigou o estresse causado pelas altas concentrações de cobre (Cu) testadas neste estudo, aumentando, assim, a tolerância das plantas de milho a esse estresse. Essa inoculação não só reduziu o acúmulo de íons de Cu nas raízes e brotos, mas também regulou os pools de osmólitos e a atividade das enzimas antioxidantes, como a catalase (CAT) e a peroxidase (POX). Dessa forma, o sistema de defesa antioxidante, juntamente com os osmólitos, desempenha um papel central na mitigação da toxicidade desse íon.

2.5 Mecanismos de ação do *Bacillus aryabhatai*

O *Bacillus aryabhatai* tem demonstrado grande potencial na promoção de crescimento de plantas por meio de diferentes mecanismos. Lee, Ka e Song (2012) observaram que a inoculação com essa bactéria aumentou a produção de giberelina (GA₃), facilitando a germinação de sementes de *Xanthium italicum*. Esse processo resultou em maior comprimento das raízes e brotos, além de um aumento na massa seca. Corroborando esses resultados, Fuga et al. (2023) demonstraram que o *B. aryabhatai* também promoveu o crescimento e a produtividade em plantas de milho, enquanto Souza et al. (2023) observaram um aumento na condutância estomática, mesmo sob condições de restrição hídrica. Esses achados foram reforçados por Silva e Silva, (2023c), que constataram efeitos benéficos na germinação de sementes de soja expostas à seca, proporcionando maior tolerância.

Quanto à nutrição mineral, isolados de *B. aryabhatai* apresentaram capacidade de mobilizar o pool de fósforo (P) no solo, mineralizando fitato por ação enzimática e solubilizando P por meio de ácidos orgânicos e inorgânicos (Ramesh et al., 2014a). A espécie também demonstrou eficácia na solubilização de zinco (Zn) (Ramesh et al., 2014b; Srithaworn et al., 2023; Ali et al., 2024) e tolerância ao estresse salino em plantas de trigo e soja (Mehmood et al., 2012). Esses resultados ressaltam o papel do *B. aryabhatai* como um bioinoculante eficaz, demonstrando suas funções como biofertilizante e sua capacidade de aumentar a tolerância ao estresse hídrico e salino. Sendo assim, diante dos desafios impostos pela seca, o uso de produtos biológicos surge como uma abordagem promissora, sendo o foco do próximo tópico, que discutirá estratégias de gestão baseadas nesses produtos para melhorar a tolerância e o desempenho das plantas no campo.

2.6 Produtos biológicos: Estratégias de gestão para melhorar a tolerância e o desempenho à seca no campo

Nos últimos anos, o crescente interesse pelo desenvolvimento de uma agricultura sustentável e regenerativa tem incentivado os produtores a substituir fertilizantes e pesticidas químicos por alternativas mais naturais (García et al., 2017), como os produtos biológicos. Esse movimento visa não apenas a redução dos impactos ambientais, mas também a promoção da saúde do solo e das plantas.

De fato, a seca é o principal fator limitante ao desenvolvimento das culturas, resultando em significativas perdas agrícolas (García et al., 2017). Dada a recorrência periódica da seca, torna-se essencial desenvolver técnicas eficazes que possam ser aplicadas para amenizar os efeitos desse estresse (Chiappero et al., 2019; Ahluwalia; Singh; Bhatia, 2021). Nesse sentido, o uso de bactérias do gênero *Bacillus* em plantas de milho pode ser uma estratégia eficaz para lidar com a baixa disponibilidade de água. O uso de rizobactérias promotoras do crescimento vegetal pode ajudar as plantas a enfrentar, pelo menos em parte, as adversidades associadas à seca (Cohen et al., 2015; Silva, 2023a).

A função dos microrganismos citados fica ainda interessante quando se analisa o *B. haynesii*, uma bactéria termofílica e resistente a elevadas temperaturas (Rehman et al., 2019; Singh e Hiranmai, 2021). Essa bactéria tem a capacidade de produzir aminoácidos que desempenham um papel crucial no ajuste osmótico das células, prevenindo a perda de água durante os períodos mais quentes do dia. O *B. aryabhattai* promove a produção de enzimas antioxidantes, com objetivo de reduzir as moléculas de radicais livres e a formação de um biofilme responsável por absorver a umidade dos exsudados radiculares. Já o *B. circulans* estimula a produção de exopolissacarídeos, que têm a capacidade de atrair moléculas de água para perto do biofilme. Também produz fitohormônios, principalmente ácido indolacético (AIA), que promove o crescimento das plantas (Saxena et al., 2020). Sendo o milho como uma das culturas de maior importância mundial, e diante do crescimento populacional, torna-se indispensável melhorar a produção e o rendimento das principais culturas, tanto em condições normais quanto em condições de seca (Santana et al., 2023).

Com as oscilações climáticas em curso, torna-se fundamental investigar os potenciais efeitos das cepas *B. haynesii*, *B. aryabhattai* e *B. circulans*, presentes no ativador microbiológico (bioinsumo), que surgem como alternativas promissoras para enfrentar os desafios impostos pela seca e melhorar a produtividade das culturas (Kavamura et al., 2013; Braga; Cruz; De Melo, 2022; Da silva et al., 2023). As plantas tratadas com esse ativador microbiológico podem estimular a formação de biofilmes microbianos no tecido radicular, compostos por exopolissacarídeos, que, além de oferecer proteção, pode promover a hidratação da planta, por meio de sua inoculação no tratamento de sementes. Esse biofilme microbiano, comumente formado por bactérias do gênero *Bacillus* (Ajjah et al., 2023), contribui para

potencializar as respostas das plantas de milho ao DH, uma vez que *Bacillus spp.* colonizam seus tecidos após a aplicação foliar, desencadeando resistência sistêmica induzida (ISR), característica associada às suas propriedades endofíticas (Miljaković; Marinković; Balešević-Tubić, 2020).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Condições de cultivo

O experimento foi conduzido em casa de vegetação do Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade e Conservação (PPGBio), pertencente ao Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde - GO, Brasil, sob a supervisão do grupo de pesquisa do Laboratório de Estudos Aplicados em Fisiologia Vegetal (LEAFv). O híbrido de milho AGN 2M88, contendo a biotecnologia VT PRO3, foi utilizado devido à sua alta tolerância ao estresse hídrico, ciclo precoce e aptidão para a produção de grãos, cultivados em vasos de 9 litros, contendo o substrato na proporção de 2:1; com duas partes de solo para uma parte de areia. Inicialmente feito a caracterização química e física do solo preparado conforme apresentado na Tabela 1, e logo após foi realizada a correção da acidez e a adubação de base, com a aplicação de 1,41 g de superfosfato triplo, 0,9 g de cloreto de potássio e 0,2 g de enxofre elementar por vaso. As plantas foram mantidas irrigadas até alcançarem o estágio de desenvolvimento V8, quando foram expostas aos tratamentos descritos na seção 3.2.

Tabela 1. Resultado da caracterização físico-química do solo em sua condição natural.

Ca	Mg	Al	H + Al	SB	CTC	P	S	K	m	V	
(cmol _c dm ⁻³)						(mg dm ⁻³)			%		
0,84	0,02	0	1,49	0,94	2,43	1,7	5	20	0	38,77	
B	Zn	Cu	Mn	Fe		M.O	pH		Argila	Areia	Silte
(mg dm ⁻³)						%	CaCl ₂	%			
0	1	0,9	7,9	74,7		2,6	5		27,9	68,8	3,4

Ca: cálcio; Mg: magnésio; Al: alumínio; H+Al: hidrogênio mais alumínio; SB: soma de bases; CTC efetiva; P: fósforo; S: enxofre; K: potássio; m: saturação por alumínio; V: saturação de bases; B: boro; Zn: zinco; Cu: cobre; Mn: manganês; Fe: ferro; M.O: matéria orgânica; pH: potencial hidrogeniônico.

3.2. Aplicação dos tratamentos

Plantas de milho no estágio de desenvolvimento V8 (oitava folha completamente expandida, antes do início do pendramento) foram expostas a sete tratamentos (Figura 1), durante 10 dias, os quais estão descritos abaixo:

T1: CT (Controle) – plantas irrigadas continuamente, na capacidade de campo;

T2: DH (Déficit hídrico) – plantas em déficit hídrico, mantidas em solo com 35% da água disponível no solo (AD);

T3: DH + AS – plantas submetidas à seca com ativador microbológico (*Bacillus aryabhatai* CBMAI 1120, *Bacillus circulans* CCT 0026 e *Bacillus haynesii* CCT 7926) em sementes.

T4: DH AS + AF (pré 120h) – plantas submetidas à seca, tratadas com ativador microbológico em sementes e nas folhas quando o solo atingiu 70% de AD.

T5: DH AS + AF (pós 48h) – plantas submetidas à seca, tratadas com ativador microbológico em sementes e nas folhas 48h após o início da seca.

T6: DH AS + AF (pós 72h) – plantas submetidas à seca, tratadas com ativador microbológico em sementes e nas folhas 72h após o início da seca.

T7: DH AS + AF (pós 120h) – plantas submetidas à seca, tratadas com ativador microbológico em sementes e nas folhas 120 h após o início da seca.

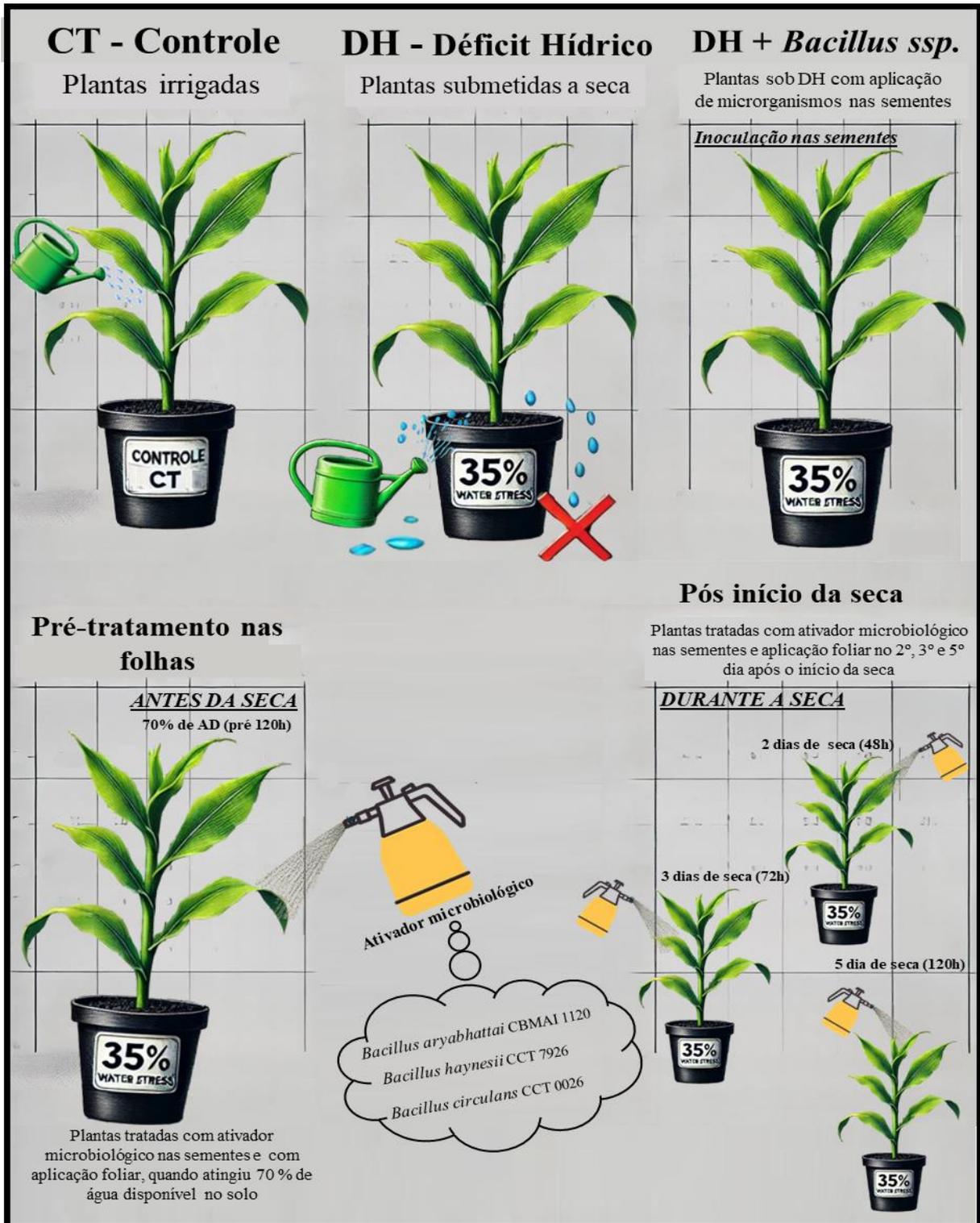


Figura 1. Esquema gráfico dos tratamentos aplicados em plantas de milho: controle, déficit hídrico, e aplicação de ativador microbiológico nas sementes e folhas, antes e durante a seca.

Todas as sementes de milho tratadas com o ativador microbiológico (bioinsumo) contendo três bactérias do gênero *Bacillus* *B. aryabhatai* CBMAI 1120 ($2,1 \times 10^{12}$ unidades formadoras de colônia – UFC de endósporos viáveis), *B. circulans* CCT 0026 ($3,0 \times 10^{12}$ UFC de endósporos viáveis) e *B. haynesii* CCT 7926. ($8,8 \times 10^{12}$ UFC de endósporos viáveis). As doses do ativador microbiológico foram calculadas de acordo com as recomendações para 1 kg de semente, utilizando 2 mL do produto.

Para ajustar o regime hídrico do substrato até atingir 35% da capacidade de campo (CC), foi utilizada a equação da curva de retenção de água. A reposição da água perdida devido à evapotranspiração (evaporação do solo) e transpiração das plantas foi realizada por meio de pesagens diárias dos vasos. Para a aplicação da junção das bactérias do gênero *Bacillus* nas folhas, foram utilizados 0,500 microlitros da solução do ativador microbiológico para o preparo da calda. O ativador microbiológico foi aspergido nas folhas com pulverizador de compressão manual, paralelo a isso, aspergiu-se água de irrigação nos tratamentos sem o bioinsumo, nas mesmas quantidades. Isso foi feito especialmente devido ao tratamento na seca que não recebeu nenhum produto microbiológico. Dessa forma, é possível verificar se o efeito observado foi devido à aplicação dos microrganismos ou da água aplicada.

Essas condições e tratamentos foram selecionados para simular e estudar os efeitos do estresse hídrico em condições específicas de desenvolvimento, antes do pendoamento e avaliar como a aplicação dos microrganismos pode influenciar a resposta das plantas ao estresse por seca, com foco nas plantas de milho, fornecendo insights valiosos para o manejo e a otimização da produtividade. Todas as avaliações para verificar a eficácia do bioinsumo foram realizadas antes e no momento da imposição do estresse hídrico, que durou 10 dias e simulou as condições de um veranico. No décimo dia de seca avaliou-se o potencial hídrico da folha, o teor relativo de água, teor de água, trocas gasosas, índices de clorofila *a* e *b*, taxa de extravasamento de eletrólitos e a massa seca. Os detalhes dessas metodologias serão apresentados a seguir.

3.3 Potenciais hídrico da folha e teor relativo de água

O potencial hídrico (Ψ_w), foi avaliado em folhas individuais de cada tratamento, conforme suas respectivas repetições. As medições do Ψ_{md} foram realizadas ao meio-dia (12:00), utilizando uma câmara de pressão do tipo Scholander (Model 1505D-EXP; Bombas

Scholander PMS).

O teor relativo de água na folha (TRA_{folha}) foi determinado através da medição do peso fresco (PF), peso túrgido (PT) e peso seco (PS), para cada órgão vegetal. Para isso, foi utilizado a seguinte fórmula:

$$TRA (\%) = ((PF - PS) / (PT - PS)) \times 100.$$

Posteriormente, três discos foliares foram retirados e pesados imediatamente após a coleta para a determinação do PF. Em seguida, os discos foram submersos em água por 24 horas à temperatura ambiente para hidratação até atingirem o peso túrgido máximo, obtendo assim o PT. Após essa etapa, os discos foram colocados em sacos de papel identificados e levados a uma estufa de circulação de ar a 70°C até secarem completamente e atingirem o peso constante, determinando o PS.

O teor de água do caule (TA_{caule}) e da raiz (TA_{raiz}) foi calculado pela diferença entre a massa fresca e a massa seca de cada órgão, normalizados pela área de cada um.

3.4 Trocas gasosas, índice de clorofilas e área foliar

Para registrar as trocas gasosas, foi utilizado um analisador portátil de gases no infravermelho (IRGA: LI6800xt, Licor[®], Nebraska, EUA), com radiação fotossinteticamente ativa (PAR) constante a uma densidade de fluxo de 1000 $\mu\text{mol f\u00f3tons m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Com este analisador portátil, foram mensurados em folhas completamente expandidas a taxa de assimilação líquida do carbono (A : $\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e taxa transpiratória (E : $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$), condutância estomática (g_s : $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$), a relação entre a concentração interna e externa de CO_2 (C_i/C_a : $\mu\text{mol mol}^{-1} \text{CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$), eficiência de carboxilação (A/C_i : $\mu\text{mol mol}^{-1} \text{CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e eficiência no uso da água (EUA: $\mu\text{mol CO}_2 \text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Após as medições de A , E , g_s e C_i/C_a , os índices de clorofila a e b foram avaliados nas mesmas folhas, utilizando-se um clorofilômetro portátil (ClorofiLOG[®]: Modelo CFL1030, Falker – Automação Agrícola) no período entre 8 e 11 horas da manhã. Em seguida, a área foliar (mm^2) foi mensurada com o auxílio do programa "ImageJ", antes das folhas de milho serem secas em estufa de circulação de ar forçada (Jadoski et al., 2012).

3.4 Extravasamento de eletrólitos

A avaliação da taxa de extravasamento de eletrólitos nos tecidos foliares, que indica a descompartimentalização celular, foi realizada mediante a taxa de liberação de eletrólitos, segundo a metodologia descrita por Lutts et al. (1996). Para isso, foram coletados três discos foliares, de cinco mm de diâmetro, de cada repetição dos tratamentos testados. Os discos foram submersos em 30 mL de água desionizada, em tubo para centrifuga do tipo falcon de 50 mL e mantidos à temperatura ambiente por 24 horas. Após este período, foi mensurado a condutividade livre (CL: $\mu\text{S}/\text{cm}$), utilizando condutivímetro portátil (Instrutherm Modelo CD-850). Posteriormente, os mesmos frascos foram transferidos para uma estufa a 100°C por uma hora para induzir o extravasamento máximo de eletrólitos. Após o resfriamento dos frascos até a temperatura ambiente, foi medida a condutividade total (CT: $\mu\text{S}/\text{cm}$). A taxa de liberação de eletrólitos foi então calculada utilizando a fórmula:

$$\text{TEE (\%)} = (\text{CL}/\text{CT}) \times 100.$$

3.5 Massa seca de folhas, caule e raiz

A determinação da biomassa de folhas, caule e raiz, após a conclusão do experimento, ambos foram separados e secos em uma estufa a 65°C até atingirem peso constante. A massa seca foi então determinada para folhas (MSF), o caule (MSC) e as raízes (MSR) das plantas de milho. Com os dados de MSF e MSC, foi obtida a massa seca da parte aérea (MSPA); a partir dos valores de MSF, MSC e MSR, foi calculada a massa seca total (MST).

3.6 Análise estatística

O delineamento experimental utilizado foi inteiramente ao acaso (DIC), com cinco repetições e sete tratamentos. Para a análise dos dados obtidos foram submetidos ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk com nível de significância (α) de 0,05 para verificar se os dados seguiam uma distribuição normal. Em seguida, os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA). Para comparação das médias, utilizou-se o teste SNK (Student Newman Keuls), com nível de significância de 5% de probabilidade ($p \leq 0,05$). As análises estatísticas foram realizadas no software SISVAR e os gráficos gerados no programa SigmaPlot.

4 RESULTADOS

Plantas de milho submetidas a dez dias de seca apresentaram alterações nas relações hídricas (Figura 1). Houve queda no potencial hídrico do meio-dia (Ψ_{md}) das plantas em déficit hídrico não tratadas com bactérias (DH) em comparação às plantas controle (CT). Em contrapartida, a aplicação das bactérias do gênero *Bacillus*, promoveu a manutenção do conteúdo de água foliar, apresentando valor de Ψ_{md} menos negativo, estando próximo às plantas controles (Figura 2A).

Em relação a quantificação dos status hídrico dos tecidos, o teor relativo de água da folha (TRA_{folha}) das plantas em DH sem microrganismos foi 12% inferior às plantas controles, com cerca de 82% de TRA (Figura 2B). Padrão semelhante foi observado nas plantas inoculadas apenas nas sementes em comparação ao DH isolado, com 84% de TRA, enquanto os demais tratamentos com o ativador microbiológico apresentaram conteúdo de água foliar estatisticamente similar as plantas controles (Figura 2B). Em contrapartida, com exceção do tratamento com bactérias aplicadas nas folhas 48h após a imposição da seca, o teor de água do caule (TA_{caule}) foi maior em todos os tratamentos em déficit hídrico, em média 9% a mais de teor em relação ao tratamento com menor conteúdo de água caulinar, o CT (Figura 2C). E por fim, não houve diferença significativa entre os tratamentos avaliados no teor de água na raiz (TA_{raiz}) (Figura 2D).

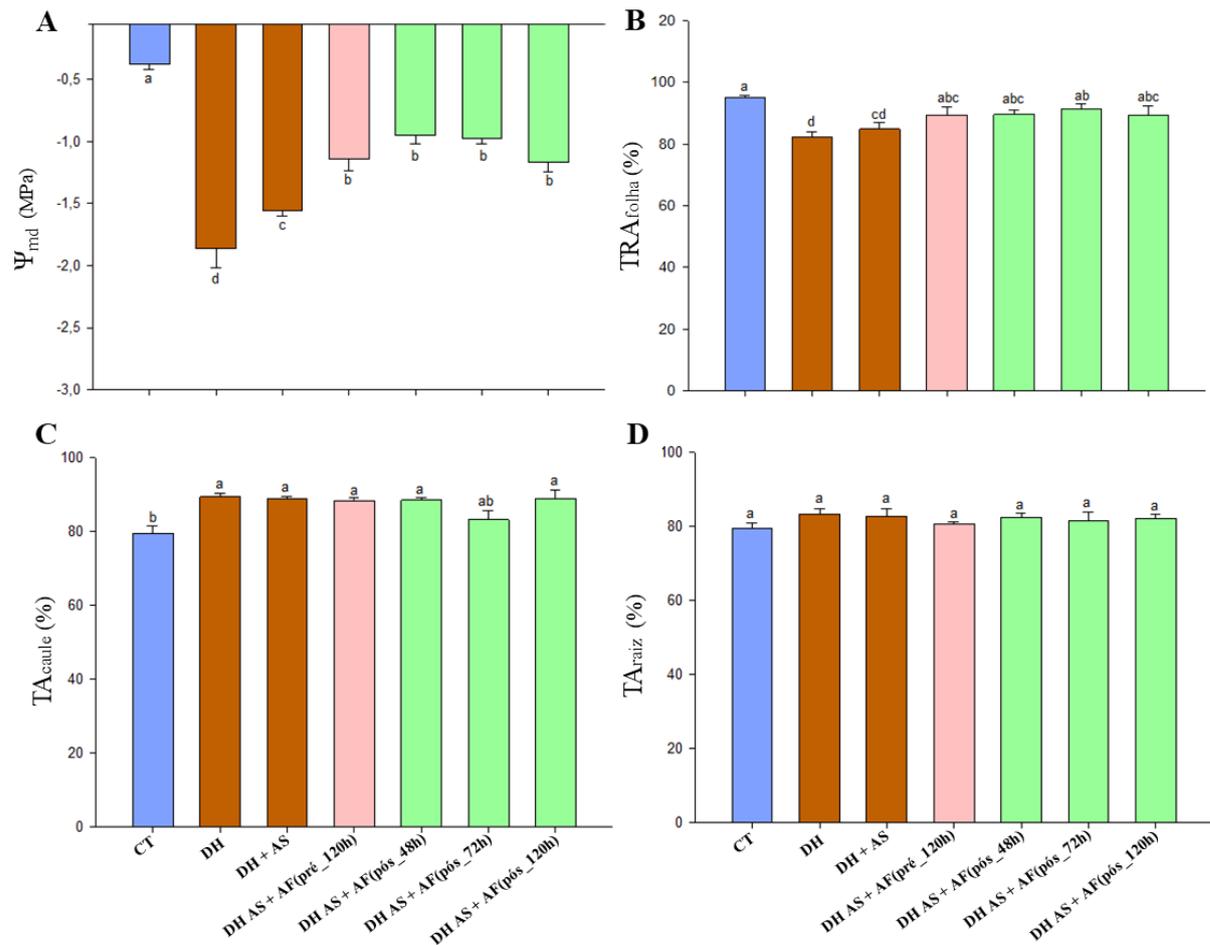


Figura 2. Potencial hídrico foliar ao meio-dia (Ψ_{md}), teor relativo de água na folha (TRA_{folha}) e teores de água no caule (TA_{caule}) e na raiz (TA_{raiz}) em plantas de milho (*Zea mays*), continuamente irrigadas (100% de água disponível no solo (AD)) e expostas à seca (35% AD), tratadas com *Bacillus aryabhattai*, *B. circulans* e *B. haynesii*. **CT:** Controle (100% AD); **DH:** Déficit hídrico (35% AD); **DH+AS:** 35% AD + ativador microbiológico nas sementes; **DH AS+AF (pré 120h):** 35% AD + ativador microbiológico nas sementes + pré-tratamento foliar (120h antes da seca); **DH AS+AF (pós 48h):** 35% AD + ativador microbiológico nas sementes + aplicação foliar (pós 48h do início da seca); **DH AS+AF (pós 72h):** 35% AD + ativador microbiológico nas sementes + aplicação foliar (após 72h do início da seca); **DH AS+AF (pós 120h):** 35% AD + ativador microbiológico nas sementes + aplicação foliar (após 120h do início da seca). Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si (teste SNK, $p \leq 0,05$).

A exposição à seca desencadeou danos às membranas foliares nos tratamentos sem os microrganismos (DH), com valor de 18% da taxa de extravasamento de eletrólitos (TEE)

em comparação ao controle (CT) (Figura 3). Valores próximos foram encontrados nos tratamentos com o ativador microbiológico no tecido foliar no período de 72h e 120h de seca. Entretanto, valores intermediários de extravasamento (14% de TEE) foram encontrados nos tratamentos com o ativador apenas em sementes, e, no tecido foliar no período de 48h de seca, porém não diferindo do DH. Em contrapartida, não foi observado danos as membranas celulares quando aplicado o ativador 120h antes da seca, estando similar as plantas CT (Figura 3).

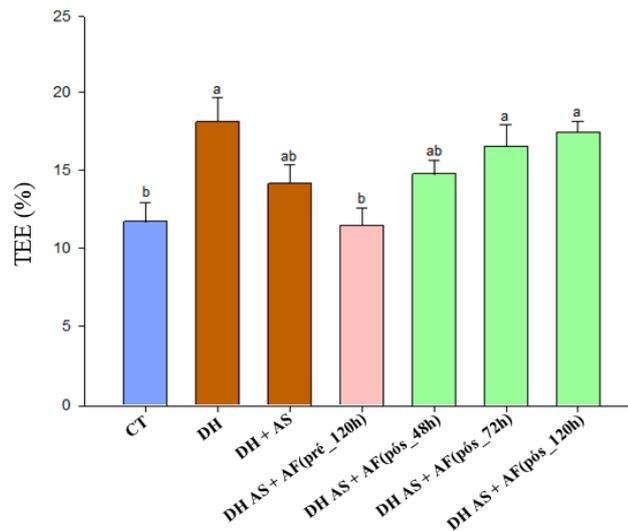


Figura 3. Taxa de extravasamento de eletrólitos (TEE) em plantas de milho (*Zea mays*), continuamente irrigadas (100% de água disponível no solo (AD)) e expostas à seca (35% AD), tratadas com *Bacillus aryabhatai*, *B. circulans* e *B. haynesii*. **CT:** Controle (100% AD); **DH:** Déficit hídrico (35% AD); **DH+AS:** 35% AD + ativador microbiológico nas sementes; **DH AS+AF (pré 120h):** 35% AD + ativador microbiológico nas sementes + pré-tratamento foliar (120h antes da seca); **DH AS+AF (pós 48h):** 35% AD + ativador microbiológico nas sementes + aplicação foliar (pós 48h do início da seca); **DH AS+AF (pós 72h):** 35% AD + ativador microbiológico nas sementes + aplicação foliar (após 72h do início da seca); **DH AS+AF (pós 120h):** 35% AD + ativador microbiológico nas sementes + aplicação foliar (após 120h do início da seca). Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si (teste SNK, $p \leq 0,05$).

A exposição aos dez dias de seca não alterou os índices de clorofilas *a* e *b* e área foliar nos tratamentos avaliados (Figura 4). Em contrapartida, alterações nos aspectos fisiológicos em plantas de milho foram observadas no décimo dia de seca (Figura 5). A taxa de assimilação líquida de carbono (*A*) nas plantas apenas em DH foram baixas em comparação ao CT (Figura

5A). Por outro lado, com exceção do tratamento pós 48h do início da seca, os ativadores microbiológicos aumentaram a taxa fotossintética quando comparado apenas ao DH (Figura 5A). O déficit hídrico resultou no fechamento estomático, levando a queda na condutância estomática (g_s) e taxa transpiratória (E) em todos os tratamentos em seca (Figura 5B-C). Comportamento similar foi observado na concentração interna e externa de CO_2 (C_i/C_a) no tratamento DH isolado em comparação ao controle, no entanto a aplicação dos microrganismos após 72h e 120h do início da seca no tecido foliar incrementou o C_i/C_a em comparação ao DH (Figura 5D). Mesmo com redução de CO_2 a junção das bactérias promoveu maior eficiência de carboxilação (A/C_i) em todos os tratamentos contendo o ativador microbiológico (Figura 5E). Em contrapartida, a eficiência no uso da água (EUA) foi maior em todos os tratamentos com restrição hídrica em relação ao tratamento que apresentou menor valor nesse parâmetro, o CT (Figura 5F).

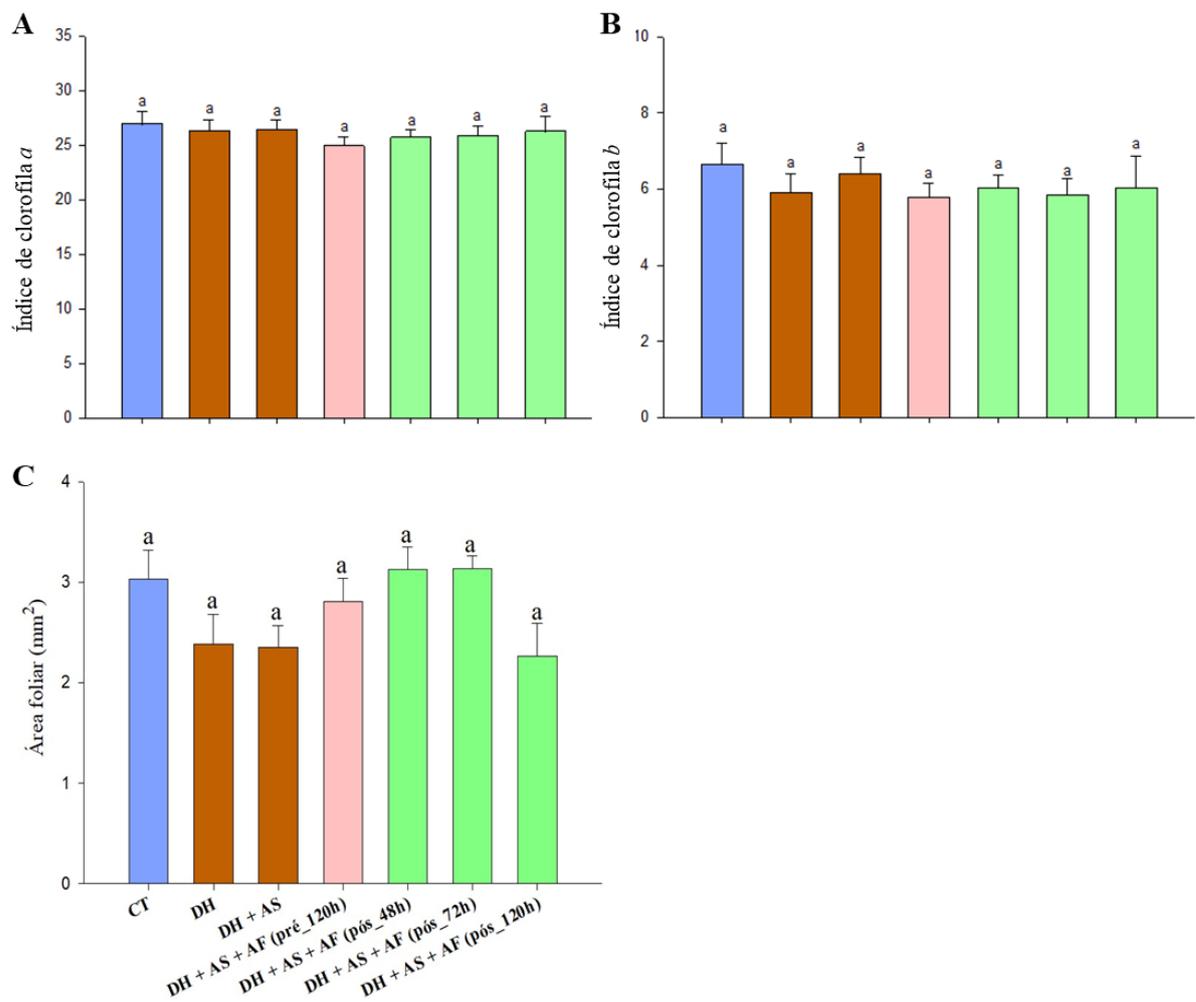


Figura 4. Índice de clorofila *a*, índice de clorofila *b* e área foliar em plantas de milho (*Zea mays*), continuamente irrigadas (100% de água disponível no solo (AD)) e expostas à seca (35% AD), tratadas com *Bacillus aryabhatai*, *B. circulans* e *B. haynesii*. **CT**: Controle (100% AD); **DH**: Déficit hídrico (35% AD); **DH+AS**: 35% AD + ativador microbiológico nas sementes; **DH AS+AF (pré 120h)**: 35% AD + ativador microbiológico nas sementes + pré-tratamento foliar (120h antes da seca); **DH AS+AF (pós 48h)**: 35% AD + ativador microbiológico nas sementes + aplicação foliar (pós 48h do início da seca); **DH AS+AF (pós 72h)**: 35% AD + ativador microbiológico nas sementes + aplicação foliar (após 72h do início da seca); **DH AS+AF (pós 120h)**: 35% AD + ativador microbiológico nas sementes + aplicação foliar (após 120h do início da seca). Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si (teste SNK, $p \leq 0,05$).

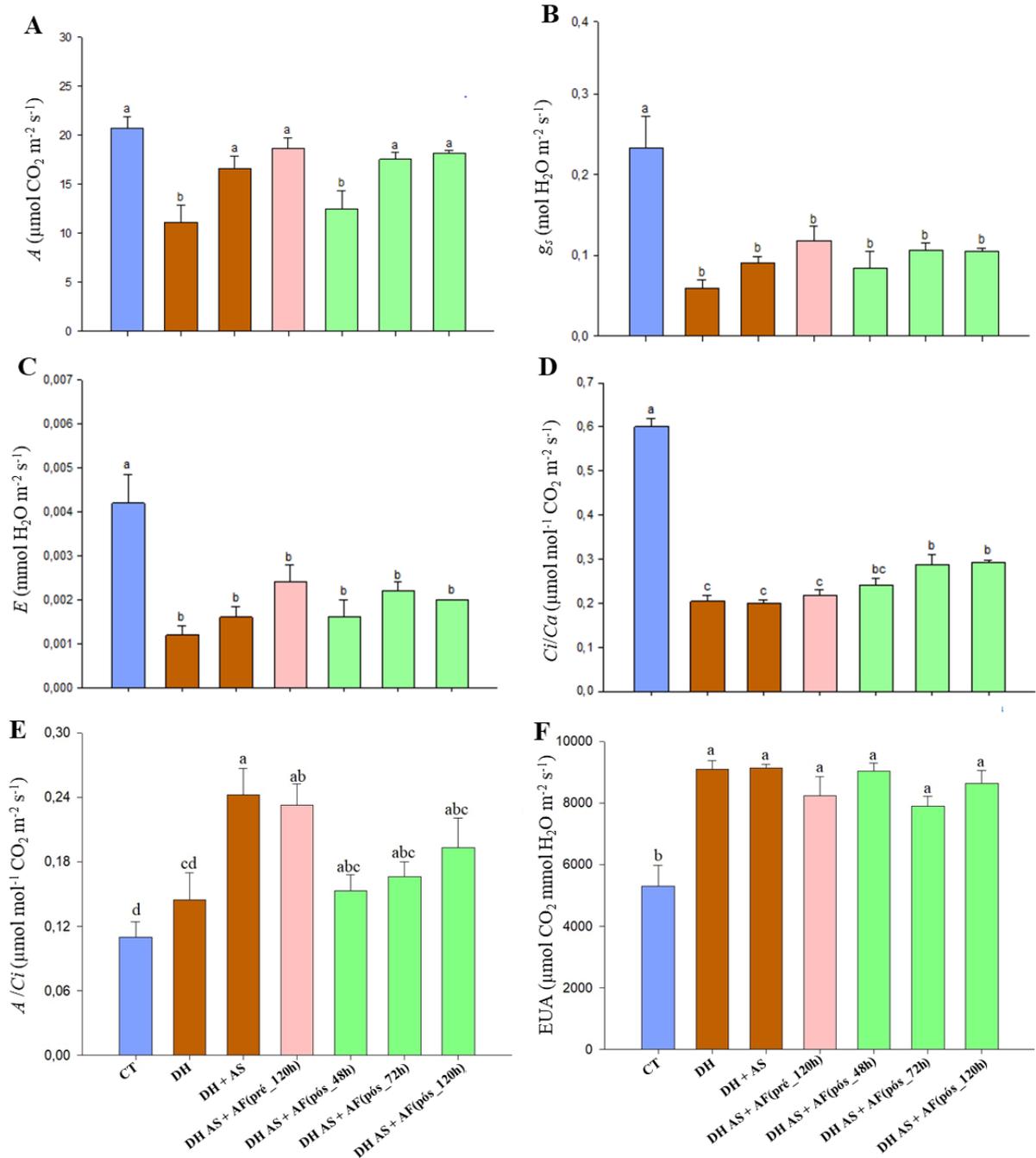


Figura 5. Taxa de assimilação líquida do carbono (A), condutância estomática (g_s), taxa transpiratória (E), concentração interna e externa de CO_2 (C_i/C_a), eficiência de carboxilação (A/C_i) e eficiência no uso da água (EUA) em plantas de milho (*Zea mays*), continuamente irrigadas (100% de água disponível no solo (AD)) e expostas à seca (35% AD), tratadas com *Bacillus aryabhattai*, *B. circulans* e *B. haynesii*. CT: Controle (100% AD); DH: Déficit hídrico (35% AD); DH+AS: 35% AD + ativador microbiológico nas sementes; DH AS+AF

(pré 120h): 35% AD + ativador microbiológico nas sementes + pré-tratamento foliar (120h antes da seca); **DH AS+AF (pós 48h):** 35% AD + ativador microbiológico nas sementes + aplicação foliar (pós 48h do início da seca); **DH AS+AF (pós 72h):** 35% AD + ativador microbiológico nas sementes + aplicação foliar (após 72h do início da seca); **DH AS+AF (pós 120h):** 35% AD + ativador microbiológico nas sementes + aplicação foliar (após 120h do início da seca). Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si (teste SNK, $p \leq 0,05$).

A exposição aos dez dias de seca ocasionou alterações na massa seca em diferentes órgãos em plantas de milho (Figura 6). Em relação a massa seca da folha (MSF), do caule (MSC), massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca da raiz (MSR) e massa seca total (MST) foi observado redução nas plantas em DH sem microrganismo em comparação ao controle (Figura 6A-E). Padrão semelhante foi observado nos tratamentos com ativador microbiológico em comparação ao DH isolado, embora tendência de incremento da massa seca em todos os parâmetros avaliados foi observado no tratamento pós 72h do início de seca, enquanto a MSF estando similar as plantas controles (Figura 6A-E).

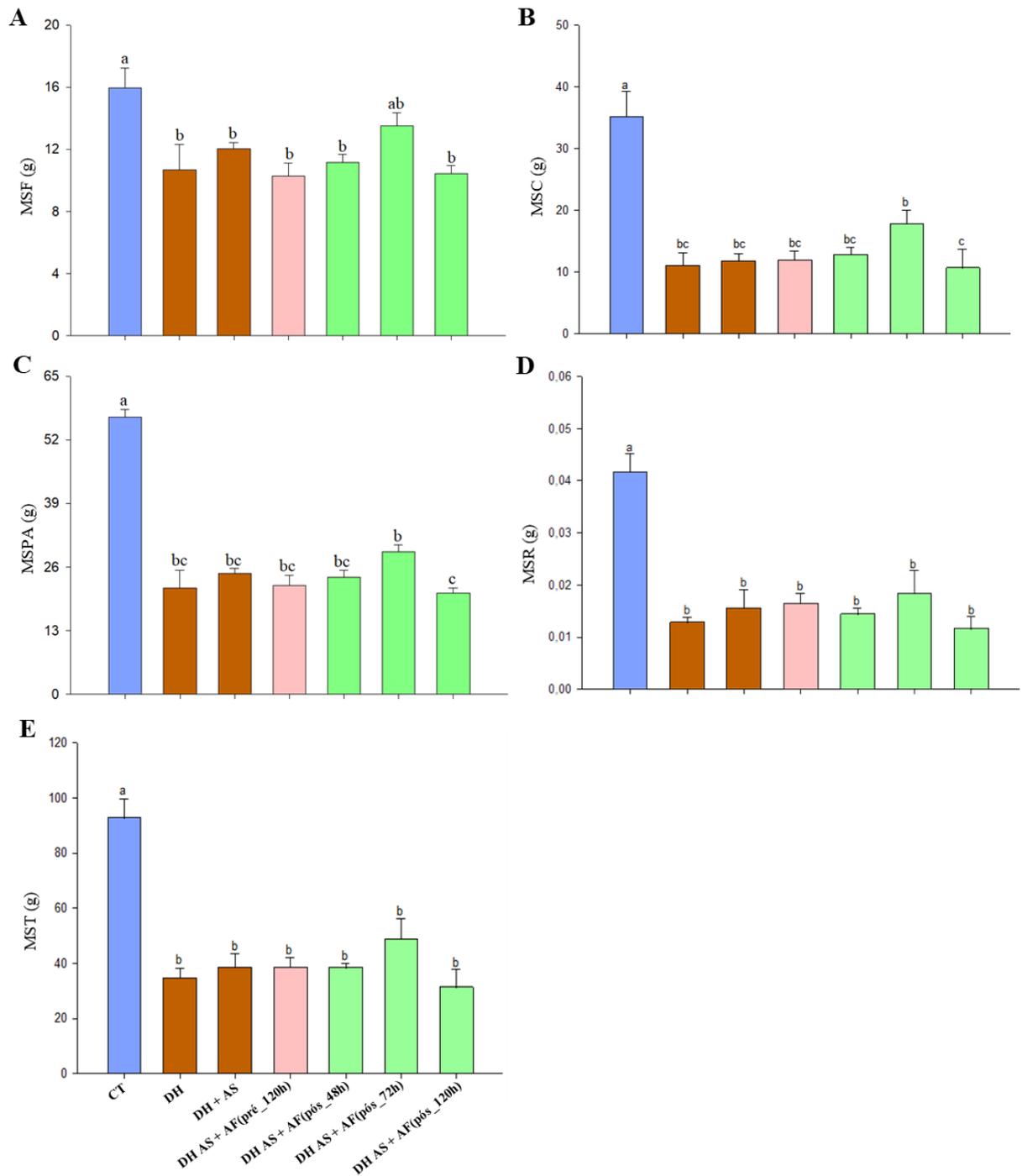


Figura 6. Massa de folhas (MSF), caule (MSC), parte aérea (MSPA), raiz (MSR) e massa total (MST) em plantas de milho (*Zea mays*), continuamente irrigadas (100% de água disponível no solo (AD)) e expostas à seca (35% AD), tratadas com *Bacillus aryabhattai*, *B. circulans* e *B. haynesii*. **CT:** Controle (100% AD); **DH:** Déficit hídrico (35% AD); **DH+AS:** 35% AD +

ativador microbiológico nas sementes; **DH AS+AF (pré 120h)**: 35% AD + ativador microbiológico nas sementes + pré-tratamento foliar (120h antes da seca); **DH AS+AF (pós 48h)**: 35% AD + ativador microbiológico nas sementes + aplicação foliar (pós 48h do início da seca); **DH AS+AF (pós 72h)**: 35% AD + ativador microbiológico nas sementes + aplicação foliar (após 72h do início da seca); **DH AS+AF (pós 120h)**: 35% AD + ativador microbiológico nas sementes + aplicação foliar (após 120h do início da seca). Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si (teste SNK, $p \leq 0,05$).

5 DISCUSSÃO

A seca, intensificada pelas mudanças climáticas, tem gerado grandes incertezas para os produtores, sobretudo em relação à perda da janela de plantio e à queda de produtividade, o que aumenta os riscos e a instabilidade no setor agrícola (Gonzaga Filho e Silva, 2023). Esse cenário tende a se agravar, pois as previsões climáticas apontam 4° a 5° graus mais quentes, o que impactará diretamente a agricultura, como já está acontecendo com a redução da precipitação em relação aos últimos 10-20 anos. Essa redução torna a produção de alimentos mais desafiadora (Bouremani et al., 2023; Kaboosi et al., 2023). Estima-se que, em até 2050, a população mundial atingirá em torno de 9,7 bilhões de pessoas, o que levanta a questão: Como alimentar quase 10 bilhões de pessoas em um cenário onde a produção agrícola já está sofrendo queda significativa devido a redução dos regimes de chuvas? Nesse contexto, torna-se essencial estudar e analisar alternativas que possam incrementar a produção agrícola (Adam, 2021). Uma das soluções propostas neste estudo foi a utilização de ativador microbiológico (bioinsumo) composto por associação de bactérias do gênero *Bacillus* (*B. aryabhatai*, *B. circulans* e *B. haynesii*) com intuito de atenuar os efeitos negativos impostos pela restrição hídrica em plantas de milho. Tais efeitos atenuantes não devem ser apenas tecnológicos, mas também biotecnológicos, de forma a promover aspectos relacionados a tolerância de plantas em condições de seca (Silva et al., 2023a).

5.1 Os ativadores microbiológicos (bioinsumos) alteram as propriedades hidráulicas de milho em condições de seca?

O potencial hídrico e o teor relativo de água são dois conceitos importantes para entender as relações hídricas das plantas. O potencial hídrico quantifica o estado energético da

água, influenciando seu movimento dentro da planta e do solo, enquanto o teor de água quantifica em porcentagem o conteúdo hídrico dos tecidos vegetais em relação ao seu estado totalmente hidratado (Swaef et al., 2022; Ievinsh, 2023). No presente estudo a seca promoveu queda no potencial hídrico do meio-dia (Ψ_{md}) em plantas não tratadas com microrganismos (Figura 2A). Por outro lado, a presença das bactérias *Bacillus aryabhattai*, *B. circulans* e *B. haynesii*, tanto em sementes quanto nas folhas conseguiram manter o Ψ_{md} próximo as plantas controles (Figura 2A). Resultado similar aos observados em sementes de milho inoculadas com *Azospirillum* e soja tratadas com *Bacillus amyloliquefaciens*, onde os microrganismos promoveram a manutenção do Ψ_{md} e conteúdo de água mesmo em condições de restrição hídrica no solo (Casanovas et al., 2002; Silva et al., 2023a). Na maioria das espécies cultivadas os teores de água oscilam entre 98% em folhas túrgidas, 60-70% no momento da murcha e 40% em folhas severamente dessecada (Zhang et al., 2018b; Pandey et al., 2023). No presente estudo, plantas em déficit hídrico com e sem a inoculação de bactérias em sementes apresentaram, em média, 83% do teor relativo de água, e quando aplicadas bactérias no tecido foliar o conteúdo de água foi superior a 89% (Figura 2B). Isso pode ser explicado pela indução do ajuste osmótico, comumente observado em plantas em condições de restrição hídrica no solo, sendo considerado um mecanismo essencial para contribuir com a absorção de água do solo e promover o turgor celular sob condições de seca (Liao et al., 2022; Da Costa Neto et al., 2023). Nesse sentido, tais compostos são exsudatos por bactérias osmotolerantes no tecido radicular, bem como, glicina betaína, prolina e açúcares (Dimkpa et al., 2009; Kasim et al., 2013).

À medida que o solo vai secando a absorção de água pelas raízes começa a se tornar inviável. Nesse sentido, o armazenado de água nos tecidos é um fator preponderante para a sobrevivência das plantas, uma vez que a liberação da água armazenada contribui para estabilizar as flutuações no potencial hídrico e retardar a ocorrência de embolismo (Carrasco et al., 2015). No presente estudo, o teor de água do caule aumentou em todos tratamentos em déficit hídrico, porém sem alteração na raiz (Figura 2 C-D). É provável que a manutenção do status hídricos nos tecidos de milho tratados com ativador microbiológico podem estar relacionada com a formação de biofilmes microbianos no tecido radicular, a partir de exopolissacarídeos, que além de proteção promove a hidratação, sendo comumente formado por bactérias do gênero *Bacillus* (Ajijah et al., 2023). Em adição, é provável que as bactérias

promoveram a manutenção dos vasos do xilema, mantendo assim o fluxo de água a longas distâncias, prevenindo a falha hidráulica. Este, por sua vez, auxiliou na recuperação do turgor celular, mantendo as folhas de milho hidratadas (Gamalero e Glick, 2022). Além disso, *Bacillus* spp. melhoram a resposta da planta de milho ao DH ao colonizar seus tecidos após aplicação foliar, desencadeando resistência sistêmica induzida (ISR) devido às suas características endofíticas (Miljaković; Marinković; Balešević-Tubić, 2020).

5.2 Influência do tempo de aplicação de ativadores microbiológicos na proteção das membranas de milho sob restrição hídrica no solo

A restrição hídrica promove acúmulo de espécies reativas de oxigênio (EROs), como ânion superóxido (O_2^-), radicais hidroxila (OH^\cdot) e peróxido de hidrogênio (H_2O_2) (Hafez et al., 2020; Dasgupta et al., 2023). O sistema de defesa antioxidante atua na eliminação de EROs, no entanto, em excesso, o dano oxidativo se intensifica causando peroxidação lipídica, disfunção proteica, danos às membranas e ácidos nucleicos podendo culminar na morte vegetal se não for devidamente controlado (Abdelaal et al., 2021; Dasgupta et al., 2023).

Estudo com milho sob condições de seca demonstrou que a aplicação de *Bacillus* spp. melhorou a estabilidade da membrana devido ao aumento das atividades das enzimas antioxidantes (Vardharajula et al., 2011). A integridade da membrana celular está intimamente relacionada à capacidade das plantas em manter o equilíbrio hídrico (Van AS, 2007). Isso deve-se ao fato de que as membranas bem hidratadas são menos propensas a danos e rupturas e auxilia na neutralização de EROs (Eswaran et al., 2024; García et al., 2017), pois a redução dos níveis de água leva a uma diminuição da pressão de turgor celular, causando danos e comprometimento na manutenção da homeostase iônica e celular (Demidchik et al., 2014). Os solutos compatíveis além de atuar no ajuste osmótico para melhorar o status hídrico contribui também para manter a estabilidade da membrana e proteção das células (Abdelaal et al., 2021). Estudos recentes apontam que os açúcares possuem atividade antioxidante para eliminar EROs, uma vez que o seu poder redutor contribui na eliminação de peróxido de hidrogênio (H_2O_2) (Abdelaal et al., 2020).

A taxa de extravasamento de eletrólitos (TEE) é um indicativo importante de estresse, sendo resultado de efeitos deletérios da integridade das membranas celulares (Demidchik et al.,

2014; Qiao et al., 2024). No presente estudo, a exposição à seca desencadeou maiores danos às membranas foliares não tratadas com as bactérias, 18% de TEE (Figura 3). O ativador microbiológico quando aplicado 72h e 120h após o início da seca não conseguiu proteger a integridade das membranas foliares de milho expostas aos dez dias de seca (18% de TEE). No entanto, à medida que a aplicação das bactérias foi aplicada com antecedência a preservação da integridade das membranas foi mais eficaz, conforme observado 14% de TEE no tratamento 48h de seca, e sem danos aparente às membranas quando pré-tratadas (120h antes do início da seca) (Figura 3). Desse modo, o tempo de aplicação de microrganismos tem impacto significativo na eficácia da ação. A formação de biofilme por bactérias do gênero *Bacillus* pode levar cerca de 24 horas após a inoculação, dependendo das condições ambientais e da interação dos microrganismos com a planta (Lastochkina et al., 2021). No estudo de Lubyanova et al. (2023) o pré-tratamento com *B. subtilis* em trigo sensível a seca regulou positivamente os parâmetros das relações hídricas. Os benefícios foram observados a curto prazo, cerca de 1 hora após a inoculação com melhorias notáveis em 24 horas, essa melhoria contribuiu para a menor TEE e preservação das membranas (Lubyanova et al., 2023). Nesse sentido, a aplicação precoce de microrganismos pode melhorar o status hídrico das plantas e ajudar a manter a integridade das membranas celulares.

5.3 Efeito do ativador microbiológico do gênero *Bacillus* nos principais aspectos fisiológicos e produção de biomassa

Plantas em condições de restrição hídrica no solo, comumente, reduzem a área foliar como uma forma de minimizar a perda de água por transpiração, uma vez que a expansão foliar representa maior área transpiratória, o que pode agravar o estresse hídrico (Kappor et al., 2020; Seleiman et al., 2021). Culturas que apresentam mecanismos de preservação da área foliar e pigmentos fotossintéticos durante a seca geralmente indica um grau de tolerância a restrição hídrica, podendo estar relacionada ao genótipo, porém essa tolerância pode ser limitada por certas restrições fisiológicas e severidade do estresse (Abdelaal et al., 2021). No presente estudo, não foi observado alterações nas clorofilas *a* e *b* e na área foliar durante a exposição de milho aos dez dias de seca (Figura 4). Em contrapartida, foi observado redução da taxa de assimilação líquida de carbono (*A*) em plantas de milho não tratadas com bactérias e tratadas

no tecido foliar 48h após o início da seca, enquanto os demais tratamentos foram similares as plantas controles (Figura 5A). É importante observar que aumentos na fotossíntese não foi acompanhado com aumentos na condutância estomática (g_s) (Figura 5B). Podendo estar relacionado com a melhoria na condutância do mesófilo (g_m) por meio da modificação da porosidade e espessura da parede celular, a qual permite maior difusão de CO_2 para a Rubisco (Salesse-Smith et al., 2024), com isso conseguem otimizar as concentrações internas de CO_2 (Seleiman et al., 2021), conforme evidenciado pelo incremento parcial da concentração interna e externa de CO_2 (C_i/C_a) em plantas tratadas com as bactérias no tecido foliar 72h e 120h de período de seca em comparação as plantas de milho não tratadas (Figura 5D). Dessa forma, a otimização no uso de CO_2 contribuiu para a maior eficiência de carboxilação (A/C_i) em todas as plantas tratadas com as bactérias (Figura 5E). É importante ressaltar que plantas com metabolismo C_4 utilizam especialização anatômica e bioquímica, incluindo a enzima PEP-carboxilase e bainha do feixe, que ao compartimentar a fixação de CO_2 permite concentrar CO_2 ao redor da Rubisco, reduzindo assim a atividade oxigenase e priorizando a atividade carboxilase (CALACE, et al., 2021). Porém, pode ser limitada por certas restrições fisiológicas e severidade ao estresse (Ahluwalia, Singh; Bhatia, 2021). Outro aspecto que pode ter contribuído para maior taxa fotossintética nas plantas tratadas com bactérias consiste na menor ocorrência de danos celulares (Figura 3). Nesse sentido, pode estar relacionado à capacidade das bactérias do gênero *Bacillus* em aumentar a atividade de enzimas antioxidantes durante períodos de seca, o que potencializa o efeito protetor das plantas ao diminuir as concentrações de EROs (Umapathi et al., 2024). Conforme evidenciado pelas baixas concentrações de H_2O_2 e marcadores de estresse oxidativo em milho e trigo em condições de seca tratadas com *Bacillus* (Azeem et al., 2021; Maslennikova e Lastochkina, 2021).

A eficiência do uso da água (EUA) de plantas em condições de restrição hídrica no solo é um fator crítico para a sobrevivência e produtividade vegetal. Vimos que todas as plantas em condições de seca, com ou sem bactérias, apresentaram aumento na EUA (Figura 5F). Nesse sentido, diversas estratégias podem ser exploradas, por exemplo, plantas na seca não tratadas com o ativador microbiológico a redução de g_s juntamente com a taxa transpiratória (E) podem ter contribuído nesse processo. Já as plantas na seca tratadas com as bactérias além da redução de g_s e E , a junção das bactérias podem ter contribuído no ajuste osmótico (Fuga et al., 2023),

aumento da absorção de nutrientes (Abdelgalil et al., 2022), aumento na síntese de hormônios vegetais (Mishra et al., 2023) e estímulo nos mecanismos de defesa antioxidante (Sahu et al., 2020; Latef et al., 2020). E estes, por sua vez, contribuíram para melhorar o status hídrico e eficiência fotossintética das plantas de milho.

A manutenção das relações hídricas e aspectos fisiológicos em plantas tratadas com ativador microbiológico em sementes e folhas, antes e durante o período de seca, não foi acompanhada pelo aumento na biomassa em diferentes órgãos (Figura 6). Porém notou-se tendência de incremento da massa seca da parte aérea (MSPA) quando o bioinsumo foi aplicado no período de 72h (3º dia de seca), uma vez que a MSF não apresentou diferença em relação às plantas controles (Figura 6A-C). A ausência de alteração na biomassa pode ser explicada pelo fato de que as plantas provavelmente direcionaram seus carboidratos para mecanismos de defesa e manutenção estrutural (Claeys e Inzé, 2013), principalmente nos aspectos relacionados ao xilema, órgão fundamental no transporte de água as longas distâncias. Dessa forma, os carboidratos não estruturais (NSCs) são essenciais para manter a função hidráulica durante a seca (Liu et al., 2023), podendo levar ao consumo em caules de acordo com a intensidade e duração do evento (Liu et al., 2023).

As plantas utilizam diferentes mecanismos para lidar com a restrição hídrica, podendo ser observada em duas categorias principais, prevenção e tolerância ao estresse (Oguz et al., 2022; Pamungkas et al., 2022). Sendo a primeira estando relacionada ao equilíbrio entre a absorção e perda de água, por meio da distribuição de carboidratos para manter o balanço hídrico, e a segunda voltada a tolerância ao estresse envolvendo a ação de mecanismos de proteção celular (Claeys e Inzé, 2013). É possível que no presente estudo as plantas de milho expostas à restrição hídrica no solo não investiram no aumento da biomassa por meio da respiração de manutenção e investimento em defesas, a fim de, manter a integridade das estruturas e um bom status hídrico (Zia et al., 2021). Contudo, com base nos resultados obtidos em nossa pesquisa, a aplicação do bioinsumo em sementes e folhas demonstrou potencial para regular o conteúdo de água, melhorar a taxa fotossintética, aumentar a hidratação dos tecidos e reduzir o dano à membrana, sendo melhor evidenciado no pré-tratamento foliar (120h antes do início da seca).

6 CONCLUSÃO

1. As plantas submetidas ao déficit hídrico não tratadas com as bactérias tiveram um impacto negativo na fisiologia das plantas, baixo potencial hídrico e teor relativo de água, que por sua vez, desencadeou maiores danos às membranas e menor taxa fotossintética.

2. A aplicação das bactérias *Bacillus haynessi*, *B. aryabhatai* e *B. circulans*, em sementes e folhas, proporcionou a hidratação dos tecidos, manutenção da integridade das membranas e aumento da taxa de assimilação de carbono.

3. O pré-tratamento foliar (120h antes do início da seca) sobressaiu-se entre os tratamentos analisados, demonstrando resultados satisfatórios na atenuação dos danos desencadeados pela escassez hídrica em plantas de milho.

7 REFERÊNCIAS

ABDEL-HAMID, M. S. et al. Plant growth-promoting properties of bacterial endophytes isolated from roots of *Thymus vulgaris* L. and investigate their role as biofertilizers to enhance the essential oil contents. **Biomolecular concepts**, v. 12, n. 1, p. 175-196, 2021.

ABDELAAL, K. A. A. et al. Exogenous application of proline and salicylic acid can mitigate the injurious impacts of drought stress on barley plants associated with physiological and histological characters. **Sustainability**, v. 12, n. 5, p. 1736, 2020.

ABDELAAL, K. et al. The Role of Plant Growth-Promoting Bacteria in Alleviating the Adverse Effects of Drought on Plants. **Biology**, v. 10, n. 6, p. 1-23, 2021.

ABDELGALIL, S. A. et al. A sustainable and effective bioprocessing approach for improvement of acid phosphatase production and rock phosphate solubilization by *Bacillus haynesii* strain ACP1. **Scientific Reports**, v. 12, n. 1, p. 8926, 2022.

ADAM, D. How far will global population rise? Researchers can't agree. **Nature**, v. 597, n. 7877, p. 462-465, 2021.

AHLUWALIA, O.; SINGH, P.C.; BHATIA, R. A review on drought stress in plants:

Implications, mitigation and the role of plant growth promoting rhizobacteria. **Resources, Environment and Sustainability**, v. 5, n. 100032, p.1-13, 2021.

AJJIAH, N. et al. Plant growth-promoting bacteria (PGPB) with biofilm-forming ability: a multifaceted agent for sustainable agriculture. **Diversity**, v. 15, n. 1, p. 112, 2023.

ALI, M. et al. Enhancing wheat yield and zinc biofortification through synergistic action of potent zinc-solubilizing bacteria and zinc sulfate in calcareous soil. **Agricultural Research**, v.1, n.1, p. 1-12, 2024.

ALVES, W. S. et al. Geotechnologies applied in the analysis of land use and land cover (LULC) transition in a hydrographic basin in the Brazilian Cerrado. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 22, n. 1, p. 1-10, 2021.

ANJUM, S. A. et al. Morphological, physiological and biochemical responses of plants to drought stress. **African journal of agricultural research**, v. 6, n. 9, p. 2026-2032, 2011.

AZEEM, M. et al. Drought stress amelioration in maize (*Zea mays* L.) by inoculation of *Bacillus* spp. strains under sterile soil conditions. **Agriculture**, v. 12, n. 1, p. 50, 2022.

BALINT, Z. et al. Monitoring drought with the combined drought index in Kenya. In: Developments in earth surface processes. **Elsevier**, 2013. p. 341-356.

BHAT, M. A. et al. Mechanistic insights of the interaction of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) with plant roots toward enhancing plant productivity by alleviating salinity stress. **Frontiers in microbiology**, v. 11, n. 1, p. 1-20, 2020.

BOUREMANI, N. et al. Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): A rampart against the adverse effects of drought stress. **Water**, v. 15, n. 3, p. 418, 2023.

CARRASCO, L. O. et al. Water storage dynamics in the main stem of subtropical tree species

differing in wood density, growth rate and life history traits. **Tree physiology**, v. 35, n. 4, p. 354-365, 2015.

CASANOVAS, E. M.; BARASSI, C. A.; SUELDO, R. J. *Azospirillum* inoculation mitigates water stress effects in maize seedlings. **Cereal Research Communications**, v. 30, n. 3, p. 343-350, 2002.

CHIAPPERO, J. et al. Plant growth promoting rhizobacteria improve the antioxidant status in *Mentha piperita* grown under drought stress leading to an enhancement of plant growth and total phenolic content. **Industrial Crops and Products**, v. 139, n. 1, p. 1-9, 2019.

CHEN, J. et al. Role of phosphatidic acid in high temperature tolerance in maize. **Crop science**, v. 50, n. 6, p. 2506-2515, 2010.

COHEN, A. C. et al. *Azospirillum brasilense* ameliorates the response of *Arabidopsis thaliana* to drought mainly via enhancement of ABA levels. **Physiologia plantarum**, v. 153, n. 1, p. 79-90, 2015.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/5354-com-nova-reducao-estimativa-para-safra-de-graos-2023-24-e-de-306-4-milhoes-de-toneladas>>. Acesso em: 07/08/2024.

CONSIDINE, M. J.; CONSIDINE, J. A. On the language and physiology of dormancy and quiescence in plants. **Journal of Experimental Botany**, v. 67, n. 11, p. 3189-3203, 2016.

CUNHA, A. P. M. A. et al. Extreme drought events over Brazil from 2011 to 2019. **Atmosphere**, v. 10, n. 11, p. 642, 2019.

CLAEYS, H.; INZÉ, D. The Agony of Choice: How Plants Balance Growth and Survival under Water-Limiting Conditions. **Plant Physiology**, v. 162, n. 1, p. 1768–1779, 2013.

DA COSTA NETO, B. P. Photosynthetic efficiency in species with C3 and C4 metabolisms. **International Journal of Advanced Engineering Research and Science**, v. 10, n. 01, p. 1-3, 2023.

DAI, A. Increasing drought under global warming in observations and models. **Nature climate change**, v. 3, n. 1, p. 52-58, 2013.

DARYANTO, S.; WANG, L.; JACINTHE, P. A. Global synthesis of drought effects on maize and wheat production. **PloS one**, v. 11, n. 5, p. e0156362, 2016.

DASGUPTA, D. et al. Bioinoculant mediated regulation of signalling cascades in various stress responses in plants. **Heliyon**, v. 9, n. 1, 2023.

DEMIDCHIK, V. et al. Stress-induced electrolyte leakage: the role of K⁺-permeable channels and involvement in programmed cell death and metabolic adjustment. **Journal of experimental botany**, v. 65, n. 5, p. 1259-1270, 2014.

DIMKPA, C.; WEINAND, T.; ASCH, F. Plant–rhizobacteria interactions alleviate abiotic stress conditions. **Plant, cell & environment**, v. 32, n. 12, p. 1682-1694, 2009.

EFEÖĞLU, B.; EKMEKÇI, Y.; ÇİÇEK, N. Physiological responses of three maize cultivars to drought stress and recovery. **South African journal of botany**, v. 75, n. 1, p. 34-42, 2009.

ELJEBBAWI, A. et al. Stem Cell Quiescence and Dormancy in Plant Meristems. **Journal of Experimental Botany**, v. 1, n. 1, p. 1-15, 2024.

ESWARAN, S. U. D. et al. Osmolyte-producing microbial biostimulants regulate the growth of *Arachis hypogaea* L. under drought stress. **BMC microbiology**, v. 24, n. 1, p. 165, 2024.

FAHAD, S. et al. Crop production under drought and heat stress: plant responses and

management options. **Frontiers in plant science**, p. 1147, 2017.

FUGA, C. A. G. et al. Growth promotion in maize (*Zea mays* L.) by *Bacillus aryabhattai* strain CMAA 1363. **Brazilian Journal of Agricultural Sciences/Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 18, n. 3, 2023.

GAMALERO, Elisa; GLICK, Bernard R. Recent advances in bacterial amelioration of plant drought and salt stress. **Biology**, v. 11, n. 3, p. 437, 2022.

GARCÍA, J. E. et al. In vitro PGPR properties and osmotic tolerance of different *Azospirillum* native strains and their effects on growth of maize under drought stress. **Microbiological Research**, v. 202, n. 1, p. 21-29, 2017.

GIORDANO, M.; PETROPOULOS, S. A.; ROUPHAEL, Y. Response and defence mechanisms of vegetable crops against drought, heat and salinity stress. **Agriculture**, v. 11, n. 5, p. 1-30, 2021.

GIRI, S.; QIU, Z. Understanding the relationship of land uses and water quality in Twenty First Century: A review. **Journal of environmental management**, v. 173, n. 1, p. 41-48, 2016.

GONZAGA FILHO, L. B.; SILVA, T. A. Viabilidade técnica da semeadura de nuvens como alternativa para minimizar impactos da seca na agricultura do Centro-Oeste. **Revista brasileira de Aviação Civil e Ciências Aeronáuticas**, v. 3, n. 5, p. 277-302, 2023.

GREGERSEN, I. B. et al. Assessing future climatic changes of rainfall extremes at small spatio-temporal scales. **Climatic Change**, v. 118, p. 783-797, 2013.

GUPTA, A. et al. Salinity alleviation and reduction in oxidative stress by endophytic and rhizospheric microbes in two rice cultivars. **Plants**, v. 12, n. 5, p. 976, 2023.

HAFEZ, Y. et al. Alleviating the detrimental impacts of salt stress on morpho-physiological

and yield characters of rice plants (*Oryza sativa* L.) using Actosol, Nano-Zn and Nano-Si. 2020.

HEYMAN, J.; KUMPF, R. P.; DE VEYLDER, L. A quiescent path to plant longevity. **Trends in Cell Biology**, v. 24, n. 8, p. 443-448, 2014.

HUSSAIN, H. A. et al. Interactive effects of drought and heat stresses on morpho-physiological attributes, yield, nutrient uptake and oxidative status in maize hybrids. **Scientific reports**, v. 9, n. 1, p. 3890, 2019.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Climate change 2022: Impacts, adaptation, and vulnerability. In Pörtner H.-O., Roberts D. C., Tignor M., et al. (Eds.), **Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press, 2022.

ISLAM, M., RAHMAN, M., BRÄUNING, A. Impact of extreme drought on tree-ring width and vessel anatomical features of *Chukrasia tabularis*, **Dendrochronologia**. 53, 63–72, 2019.

IEVINSH, G. Water content of plant tissues: So simple that almost forgotten? **Plants**, v. 12, n. 6, p. 1238, 2023.

JABBOROVA, D. et al. Co-inoculation of biochar and arbuscular mycorrhizae for growth promotion and nutrient fortification in soybean under drought conditions. **Frontiers in plant science**, v. 13, p. 947547, 2022.

JADOSKI, S. O. et al. Método de determinação da área foliar da cultivar de batata Ágata a partir de dimensões lineares. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 33, n. 6Sup11, p. 2545-2554, 2012.

KABOOSI, E. et al. Comparison of *Serendipita indica* inoculums and a commercial biofertilizer effects on physiological characteristics and antioxidant capacity of maize under

drought stress. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 23, n. 1, p. 900-911, 2023.

KAJLA, M. et al. Increase in wheat production through management of abiotic stresses: a review. **Journal of Applied and Natural Science**, v. 7, n. 2, p. 1070-1080, 2015.

KAPOOR, D. et al. The impact of drought in plant metabolism: How to exploit tolerance mechanisms to increase crop production. **Applied Sciences**, v. 10, n. 16, p. 5692, 2020.

KASIM, W. A. et al. Control of drought stress in wheat using plant-growth-promoting bacteria. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 32, n. 1, p. 122-130, 2013.

KAVAMURA, V. N. et al. Screening of Brazilian cacti rhizobacteria for plant growth promotion under drought. **Microbiological research**, v. 168, n. 4, p. 183-191, 2013.

LASTOCHKINA, O. V. Adaptation and tolerance of wheat plants to drought mediated by natural growth regulators *Bacillus spp.*: Mechanisms and practical importance. **Agric. Biol**, v. 56, p. 843-867, 2021.

LATEF, A. A. H. A. et al. Mitigation of copper stress in maize by inoculation with *Paenibacillus polymyxa* and *Bacillus circulans*. **Plants**, v. 9, n. 11, p. 1513, 2020.

LEE, S.; KA, Jong-Ok; SONG, Hong-Gyu. Growth promotion of *Xanthium italicum* by application of rhizobacterial isolates of *Bacillus aryabhatai* in microcosm soil. **The Journal of Microbiology**, v. 50, n. 1, p. 45-49, 2012.

LIAO, Qi et al. Mild water and salt stress improve water use efficiency by decreasing stomatal conductance via osmotic adjustment in field maize. **Science of the Total Environment**, v. 805, p. 150364, 2022.

LIU, Q. et al. Coordination between non-structure carbohydrates and hydraulic function under

different drought duration, intensity, and post-drought recovery. **Environmental and Experimental Botany**, v. 215, p. 105485, 2023.

LUBYANOVA, Alsu R.; ALLAGULOVA, Chulpan R.; LASTOCHKINA, Oksana V. The effects of seed pretreatment with endophytic bacteria *Bacillus subtilis* on the water balance of spring and winter wheat seedlings under short-time water deficit. **Plants**, v. 12, n. 14, p. 2684, 2023.

LUTTS, S., KINET, J. M., BOUHARMONT, J. Effects of salt stress on growth, mineral nutrition and proline accumulation in relation to osmotic adjustment in rice (*Oryza sativa* L.) cultivars differing in salinity resistance. **Plant Growth Regulation**, v.19, n.1, p. 207-218, 1996.

MAHESHWARI, R. et al. Exploração de bactérias endofíticas promotoras do crescimento de plantas de *Pisum sativum* e *Cicer arietinum* do sudoeste de Haryana. **Journal of Basic Microbiology** , v. 62, n. 7, p. 857-874, 2022.

MARTINS, M. A. et al. Improving drought management in the Brazilian semiarid through crop forecasting. **Agricultural Systems**, v. 160, n. 1, p. 21–30, 2018.

MASLENNIKOVA, D.; LASTOCHKINA, O. Contribution of ascorbate and glutathione in endobacteria *Bacillus subtilis*-mediated drought tolerance in two *Triticum aestivum* L. genotypes contrasting in drought sensitivity. **Plants**, v. 10, n. 12, p. 2557, 2021.

MAURYA, A. et al. Biofilm formation and extracellular polymeric substance (EPS) production by *Bacillus haynesii* and influence of hexavalent chromium. **Bioresource Technology**, v. 352, p. 127109, 2022.

MEHTA, P. et al. Efficiency of plant growth-promoting P-solubilizing *Bacillus circulans* CB7 for enhancement of tomato growth under net house conditions. **Journal of basic microbiology**, v. 55, n. 1, p. 33-44, 2015.

MEHMOOD, S. et al. Alleviation of salt stress in wheat seedlings via multifunctional *Bacillus aryabhatai* PM34: an in-vitro study. **Sustainability**, v. 13, n. 14, p. 8030, 2021.

MENGUE, V. P. et al. LAND-USE and land-cover change processes in Pampa biome and relation with environmental and socioeconomic data. **Applied Geography**, v. 125, n. 1, p. 1-12, 2020.

MEZA, I. et al. Global-scale drought risk assessment for agricultural systems. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 20, n. 2, p. 695-712, 2020.

MILJAKOVIĆ, D.; MARINKOVIĆ, J.; BALEŠEVIĆ-TUBIĆ, S. The significance of *Bacillus spp.* in disease suppression and growth promotion of field and vegetable crops. **Microorganisms**, v. 8, n. 7, p. 1037, 2020.

MISHRA, R. K. et al. Characterization of plant growth-promoting, antifungal, and enzymatic properties of beneficial bacterial strains associated with pulses rhizosphere from Bundelkhand region of India. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 54, n. 3, p. 2349-2360, 2023.

MORITA, T.; NAKIĆENOVIĆ, N.; ROBINSON, J. Overview of mitigation scenarios for global climate stabilization based on new IPCC emission scenarios (SRES). **Environmental Economics and Policy Studies**, v. 3, n. 2, p. 65-88, 2000.

MULLER, B. et al. Water deficits uncouple growth from photosynthesis, increase C content, and modify the relationships between C and growth in sink organs. **Journal of Experimental Botany**, v. 62, n. 6, p. 1715-1729, 2011.

OGUZ, M. C. et al. Drought stress tolerance in plants: Interplay of molecular, biochemical and physiological responses in important development stages. **Physiologia**, v. 2, n. 4, p. 180-197, 2022.

PAMUNGKAS, S. S. T. et al. Drought stress: responses and mechanism in plants. **Reviews in Agricultural Science**, v. 10, p. 168-185, 2022.

PANDEY, B.; GARKOTI, M.; KUMAR, R.; CHANDRA, N.; ARYA, D. Evaluation of relative water content in some selected herbaceous plants along the Kosi Watershed, Kumaun Himalaya. **International Journal of Botany Studies**, v. 8, n. 10, p.1-4, 2023.

PATEL, M.; VURUKONDA, S. S. K. P.; PATEL, A. Multi-trait halotolerant plant growth-promoting bacteria mitigate induced salt stress and enhance growth of *Amaranthus viridis*. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 23, n. 2, p. 1860-1883, 2023.

PERDOMO, J. A. et al. Rubisco and rubisco activase play an important role in the biochemical limitations of photosynthesis in rice, wheat, and maize under high temperature and water deficit. **Frontiers in plant science**, v. 8, p. 490, 2017.

QIAO, M. et al. Impacts of drought on photosynthesis in major food crops and the related mechanisms of plant responses to drought. **Plants**, v. 13, n. 13, p. 1808, 2024.

RAMESH, A. et al. Phosphorus mobilization from native soil P-pool upon inoculation with phytate-mineralizing and phosphate-solubilizing *Bacillus aryabhatai* isolates for improved P-acquisition and growth of soybean and wheat crops in microcosm conditions. **Agricultural Research**, v. 3, n.1, p. 118-127, 2014a.

RAMESH, A. et al. Inoculation of zinc solubilizing *Bacillus aryabhatai* strains for improved growth, mobilization and biofortification of zinc in soybean and wheat cultivated in Vertisols of central India. **Applied Soil Ecology**, v. 73, n. 1, p. 87-96, 2014b.

RASHEED, A. et al. Key insights to develop drought-resilient soybean: A review. **Journal of King Saud University-Science**, v. 34, n. 5, p. 102089, 2022.

REANG, L. et al. Plant growth promoting characteristics of halophilic and halotolerant bacteria isolated from coastal regions of *Saurashtra Gujarat*. **Scientific reports**, v. 12, n. 1, p. 4699, 2022.

REHMAN, S. et al. Isolation and characterization of a novel thermophile; *Bacillus haynesii*, applied for the green synthesis of ZnO nanoparticles. **Artificial Cells, Nanomedicine, and Biotechnology**, v. 47, n. 1, p. 2072-2082, 2019.

REN, Y. et al. Pipe Cavitation Parameters Reveal Bubble Embolism Dynamics in Maize Xylem Vessels across Water Potential Gradients. **Agriculture**, v. 13, n. 10, p. 1867, 2023.

SAHU, P. K. et al. Endophytic bacilli from medicinal-aromatic perennial Holy basil (*Ocimum tenuiflorum* L.) modulate plant growth promotion and induced systemic resistance against *Rhizoctonia solani* in rice (*Oryza sativa* L.). **Biological control**, v. 150, p. 104353, 2020.

SAHU, P. K. et al. Inter-genera colonization of *Ocimum tenuiflorum* endophytes in tomato and their complementary effects on Na⁺/K⁺ balance, oxidative stress regulation, and root architecture under elevated soil salinity. **Frontiers in microbiology**, v. 12, p. 744733, 2021.

SALEHI-LISAR, S. Y.; BAKHSHAYESHAN-AGDAM, H. Drought stress in plants: causes, consequences, and tolerance. **Drought Stress Tolerance in Plants**, v. 1, n. 1, p. 1-16, 2016.

SALESSE-SMITH, C. E. et al. Greater leaf photosynthesis in the field by increasing mesophyll conductance via modified cell wall porosity and thickness in tobacco. **bioRxiv**, p. 2024.02.13.580201, 2024.

SANTANA, L. R. et al. Arbuscular mycorrhizal fungi associated with maize plants during hydric deficit. **Scientific Reports**, v. 13, n. 1, p. 1519, 2023.

SANTOS, T. B. et al. Physiological responses to drought, salinity, and heat stress in plants: a

review. **Stresses**, v. 2, n. 1, p. 113-135, 2022.

SAXENA, A. K. et al. *Bacillus* species in soil as a natural resource for plant health and nutrition. **Journal of applied microbiology**, v. 128, n. 6, p. 1583-1594, 2020.

SELEIMAN, M. F. et al. Drought stress impacts on plants and different approaches to alleviate its adverse effects. **Plants**, v. 10, n. 2, p. 259, 2021.

SERNA, L. Maize stomatal responses against the climate change. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, n. 1, p. 1-9, 2022.

SILVA, M. C. A. P. et al. With a little help from my friends: inoculation with *Bacillus amyloliquefaciens* and *Trichoderma asperellum* alleviates drought and salt stress in soybean. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, p. 1-15, 2023a.

SILVA, D. S. et al. Temperature effect on Brazilian soybean yields, and farmers' responses. **International Journal of Agricultural Sustainability**, v. 21, n. 1, p. 2173370, 2023b.

SILVA, I. P. C.; SILVA, W. F. Tolerância ao déficit hídrico na germinação de sementes de soja tratadas com *Bacillus aryabhatai*. **Cerrado Agrociências**, v. 14, n. 1, p. 46-55, 2023c.

SINGH, S.; HIRANMAI, R. Y. Monitoring and molecular characterization of bacterial species in heavy metals contaminated roadside soil of selected region along NH 8A, Gujarat. **Heliyon**, v. 7, n. 11, 2021.

SOUSA, H. C. et al. Respostas fisiológicas de milho inoculado sob estresses salino e hídrico. In: **VIII Inovagri International Meeting e XXXII CONIRD**. Fortaleza: Colibri, 2023. p. 4-5.

SRITHAWORN, M. et al. Zinc solubilizing bacteria and their potential as bioinoculant for growth promotion of green soybean (*Glycine max* L. Merr.). **PeerJ**, v. 11, n. 1, p. 1-17, 2023.

SWAEF, T. et al. On the pivotal role of water potential to model plant physiological processes. ***in silico Plants***, v. 4, n. 1, p. 1-28, 2022.

TRENBERTH, K. E. et al. Global warming and changes in drought. **Nature Climate Change**, v. 4, n. 1, p. 17-22, 2014.

UMAPATHI, M. et al. *Bacillus sp.* and *Pseudacidovorax intermedius* colonization effect on biochemical and metabolites expression in drought-stressed *Sorghum bicolor* (L.) Moench. **Plant Stress**, v. 11, p. 100424, 2024.

VAN AS, H. Intact plant MRI for the study of cell water relations, membrane permeability, cell-to-cell and long distance water transport. **Journal of Experimental Botany**, v. 58, n. 4, p. 743-756, 2007.

VARDHARAJULA, S. et al. Drought-tolerant plant growth promoting *Bacillus spp.*: effect on growth, osmolytes, and antioxidant status of maize under drought stress. **Journal of Plant Interactions**, v. 6, n. 1, p. 1-14, 2011.

VISHNUPRADEEP, R. et al. Plant growth promoting bacteria improve growth and phytostabilization potential of *Zea mays* under chromium and drought stress by altering photosynthetic and antioxidant responses. **Environmental Technology & Innovation**, v. 25, p. 102154, 2022.

WEBBER, H. et al. Diverging importance of drought stress for maize and winter wheat in Europe. **Nature Communications**, v. 9, n. 1, p. 4249, 2018.

YU, C.; MIAO, R.; KHANNA, M. Maladaptation of US corn and soybeans to a changing

climate. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, p. 12351, 2021.

ZIA, R. et al. Plant survival under drought stress: Implications, adaptive responses, and integrated rhizosphere management strategy for stress mitigation. **Microbiological Research**, v. 242, n. 1, p.1-16, 2021.

ZHANG, J. et al. The responses of plant leaf CO₂/H₂O exchange and water use efficiency to drought: a meta-analysis. **Sustainability**, v. 10, n. 2, p. 551, 2018a.

ZHANG, X. et al. Effects of drought stress and water recovery on physiological responses and gene expression in maize seedlings. **BMC Plant Biology**, v. 18, p. 1-16, 2018b.

ZHENG, Wenjuan et al. Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) reduce evaporation and increase soil water retention. **Water Resources Research**, v. 54, n. 5, p. 3673-3687, 2018.