

UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS

Efeito mitigador do silicato de potássio, extrato de algas e *Bacillus subtilis* no potencial de recuperação de mudas de *Cedrela fissilis* Vell., sob estresse hídrico

Rodrigo da Silva Bernardes

DOURADOS
MATO GROSSO DO SUL
2026

**Efeito mitigador do silicato de potássio, extrato de algas e *Bacillus subtilis*
no potencial de recuperação de mudas de *Cedrela fissilis* Vell., sob estresse
hídrico**

Rodrigo da Silva Bernardes

Engenheiro agrônomo

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Silvana de Paula Quintão Scalon

Co-orientador: Prof. Dr^º. Cleberton Correia Santos

Tese apresentada à Universidade Federal da Grande
Dourados, como parte das exigências do Programa de
Pós-Graduação em Agronomia - Produção Vegetal,
para obtenção do título de Doutor.

Dourados

Mato Grosso do Sul

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).

B523e Bernardes, Rodrigo Da Silva

Efeito mitigador do silicato de potássio, extrato de algas e bacillus subtilis no potencial de recuperação de mudas de Cedrela fissilis Vell., sob estresse hídrico [recurso eletrônico] / Rodrigo Da Silva Bernardes. -- 2026.

Arquivo em formato pdf.

Orientadora: Silvana de Paula Quintão Scalon.

Coorientador: Cleberton Correia Santos.

Tese (Doutorado em Agronomia)-Universidade Federal da Grande Dourados, 2026.

Disponível no Repositório Institucional da UFGD em:

<https://portal.ufgd.edu.br/setor/biblioteca/repositorio>

I. Plasticidade fenotípica. 2. Silício. 3. Alagamento. 4. Déficit hídrico. 5. Bacillus subtilis. I. Scalon, Silvana De Paula Quintão. II. Santos, Cleberton Correia. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

©Direitos reservados. Permitido a reprodução parcial desde que citada a fonte.

**Efeito mitigador do silicato de potássio, extrato de algas e *Bacillus subtilis*
no potencial de recuperação de mudas de *Cedrela fissilis* Vell., sob estresse
hídrico**

por

Rodrigo da Silva Bernardes

Tese apresentada como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de
DOUTOR EM AGRONOMIA

Aprovado em: 03/03/2026

Documento assinado digitalmente
 SILVANA DE PAULA QUINTAO SCALON
Data: 19/05/2026 11:18:16-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dra. Silvana de Paula Q. Scalon
Orientadora – UFGD/FCA

Documento assinado digitalmente
 DAIANE MUGNOL DRESCH
Data: 22/05/2026 00:07:50-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dra. Daiane Mugnol Dresch

Documento assinado digitalmente
 CLEBERTON CORREIA SANTOS
Data: 21/05/2026 22:53:16-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Cleberton Correia Santos
Coorientador - UFGD/FCA

Documento assinado digitalmente
 MARIA DO CARMO VIEIRA
Data: 22/05/2026 09:37:20-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dra. Maria do Carmo Vieira
UFGD/FCA

Documento assinado digitalmente
 MAILSON VIEIRA JESUS
Data: 19/05/2026 12:02:12-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Mailson Vieira Jesus
UNIGRAN Dourados

“Todo conhecimento se inicia com sentimentos”

Leonardo da Vinci

Aos meus pais, Rosana e Roberto.
Aos meus irmãos, João e Rud.
Ao meu namorado, Vitor.
A todos aqueles que estiveram ao meu lado em cada passo.
Dedico, com gratidão e meu coração.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Rosana Santos da Silva e Roberto Nunes Bernardes, por me incentivar e me ajudar a chegar até aqui. Todo meu amor e gratidão!!

Aos meus irmãos João Roberto da Silva Bernardes e Rudnei da Silva Bernardes, por estarem ao meu lado;

Um agradecimento em especial ao meu namorado Vitor Fonseca Targa, pela paciência e entendimento da importância d'eu sentar e escrever essa tese; Te amo!!

À minha avó Sebastiana Socorro da Silva, que me liga semanalmente, demonstrando preocupação;

Ao Grupo de Estudos em Ecofisiologia de Plantas – GEEP, por toda ajuda nas avaliações em campo e de laboratório;

Aos meus amigos e parceiros de pesquisa, Anderson Dias, Juliana Silvério, Jessica Linné, Leilaine e Lidiane Borges e um agradecimento especial a minha maior companheira de luta Thaise Dantas, pelos vários dias que se dispuseram a estar comigo e sem mim nas avaliações de laboratório e do campo. Vocês são incríveis!!

À professora Silvana de Paula Quintão Scalon, pela orientação, paciência, puxões de orelha e ensinamentos repassados;

Ao professor Cleberton Correia Santos, pela coorientação e colaboração nas análises estatísticas e revisões da redação;

Aos meus amigos, Pedro Araújo Fernandes e Tainan Fabbri Scalco, que me acompanharam em todo processo de doutorado;

Às meninas do gabinete, Carol Dias, Hervillyn Kaytt, Juciele Barreto, Rosana Daza, Thaise Barbosa e Valesca Leão, pela compreensão em dias que cheguei mais tarde devido à escrita da madrugada;

Ao meu amigo e melhor vereador de Dourados, Franklin Schmalz, por ser tão incrível e parceiro em todos os nossos sonhos;

A todos meus amigos, de dentro e fora da faculdade, que de alguma forma me apoiaram durante o processo;

À Universidade Federal da Grande Dourados, pela oportunidade de realizar o doutorado em Produção Vegetal;

Enfim, a todos e todas que me apoiaram direto e indiretamente para realização deste trabalho;

À CAPES, pela bolsa concedida.

SUMÁRIO

RESUMO GERAL	x
GENERAL ABSTRACT	xi
1. INTRODUÇÃO GERAL	12
2. HIPÓTESE	17
3. OBJETIVOS	18
4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	19

CAPÍTULO I: SILICATO DE POTÁSSIO, EXTRATO DE ALGA E BACTÉRIA NO CRESCIMENTO, METABOLISMO FOTOSSINTÉTICO E ANTIOXIDANTE DAS MUDAS DE *Cedrela fissilis* Vell., SOB ALAGAMENTO.

RESUMO	25
ABSTRACT	26
1. INTRODUÇÃO	27
2. MATERIAL E MÉTODOS	30
3. RESULTADOS	37
4. DISCUSSÃO	43
5. CONCLUSÃO	47
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48

CAPÍTULO II: EFEITO MITIGADOR DO SILICATO DE POTÁSSIO E *Bacillus subtilis* NO POTENCIAL DE RECUPERAÇÃO DE MUDAS DE *Cedrela fissilis* Vell SOB FLUTUAÇÃO HÍDRICA.

RESUMO	53
ABSTRACT	54
1. INTRODUÇÃO	55
2. MATERIAL E MÉTODOS	58
3. RESULTADOS	64
4. DISCUSSÃO	72
5. CONCLUSÃO	76

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77
CONSIDERAÇÕES GERAIS	82
ANEXOS	83

RESUMO GERAL

Mudanças climáticas globais têm tornado frequentes as alterações morfofisiológicas e bioquímicas em plantas frente aos estresses abióticos. Nesse contexto, a água limita o desenvolvimento vegetal devido ao aumento de déficits hídricos e alagamentos extremos. Esse cenário reforça a necessidade de aprofundar o conhecimento ecofisiológico para produção de mudas florestais de qualidade. Assim, buscam-se estratégias para mitigar danos metabólicos e ampliar a tolerância à flutuação hídrica. O uso de bioestimulantes surge como alternativa para elevar a resiliência vegetal, com o silicato de potássio atuando no suporte estrutural e hídrico, o extrato de alga no equilíbrio metabólico-hormonal e a *B. subtilis* na promoção radicular e indução de resistência. Diante disso, o presente estudo teve como objetivo avaliar os metabolismos morfofisiológico, bioquímico e antioxidante de mudas de *Cedrela fissilis* Vell. submetidas a diferentes condições hídricas, bem como o seu potencial de recuperação, além de investigar se a aplicação de silicato de potássio, extrato de alga marinha (*Ascophyllum nodosum*) e *B. subtilis*, de forma isolada ou combinada, é capaz de mitigar os efeitos dos estresses hídricos. No primeiro experimento, as mudas foram submetidas ao alagamento, associado ou não à aplicação dos mitigadores, sendo avaliados o crescimento, as trocas gasosas, a eficiência fotoquímica e a atividade antioxidante durante o estresse e após a fase de recuperação. Verificou-se que o alagamento comprometeu significativamente o metabolismo fotossintético e o crescimento das mudas não tratadas, enquanto a aplicação dos mitigadores promoveu maior manutenção da taxa fotossintética, recuperação da condutância estomática e estabilidade do aparato fotossintético. O silicato de potássio destacou-se por favorecer a integridade estrutural e a eficiência fotoquímica, enquanto a inoculação com *B. subtilis* contribuiu para ajustes morfológicos e osmóticos, resultando em maior preservação da arquitetura foliar. No segundo experimento, as mudas foram submetidas à flutuação hídrica, caracterizada pela alternância entre déficit hídrico, reidratação e posterior alagamento, associada ou não à aplicação de silicato de potássio e *B. subtilis*. Observou-se que o déficit hídrico inicial promoveu significativa redução da atividade fotossintética, fechamento estomático e limitação das trocas gasosas, independentemente da aplicação dos mitigadores nesse momento. Contudo, durante a recuperação e no estresse subsequente por alagamento, ficou evidente que os tratamentos com silicato de potássio e bactéria reconfiguraram a resposta fisiológica das mudas, conferindo maior tolerância ao estresse sequencial. O silicato de potássio contribuiu para a estabilidade de membranas e redução da dependência de respostas antioxidantes enzimáticas intensas, enquanto *B. subtilis* favoreceu o ajuste osmótico e a manutenção da biomassa. A atividade das enzimas antioxidantes revelou um alto custo metabólico associado ao histórico de estresse nas mudas não tratadas, enquanto os mitigadores permitiram respostas mais equilibradas e eficientes. De modo geral, os resultados demonstram que *C. fissilis* é sensível às variações na disponibilidade hídrica, porém apresenta elevada plasticidade fisiológica quando submetida a estratégias adequadas de manejo. A aplicação de silicato de potássio e *B. subtilis* mostrou-se eficiente na mitigação dos danos causados por estresses hídricos isolados ou sequenciais, promovendo mecanismos complementares de tolerância e recuperação. Esses resultados reforçam a importância da adoção de práticas mitigadoras ainda na fase de viveiro, visando à produção de mudas mais resilientes e com maior potencial de sobrevivência em ambientes sujeitos à instabilidade hídrica.

PALAVRAS CHAVES: Plasticidade fenotípica, silício, alagamento, déficit hídrico, *Bacillus subtilis*

GENERAL ABSTRACT

Global climate change has made morphophysiological and biochemical alterations in plants more frequent in response to abiotic stresses. In this context, water limits plant development due to increased water deficits and extreme flooding. This scenario reinforces the need to deepen ecophysiological knowledge for the production of high-quality forest seedlings. Thus, strategies are sought to mitigate metabolic damage and increase tolerance to water fluctuations. The use of biostimulants emerges as an alternative to increase plant resilience, with potassium silicate acting in structural and water support, algae extract in metabolic-hormonal balance, and *B. subtilis* in root promotion and resistance induction. Therefore, the present study aimed to evaluate the morphophysiological, biochemical, and antioxidant metabolisms of *Cedrela fissilis* Vell. seedlings. This study aimed to evaluate the effects of water stress on seedlings subjected to different water conditions, as well as their recovery potential, and to determine if the application of potassium silicate, seaweed extract (*Ascophyllum nodosum*), and *B. subtilis*, alone or in combination, can mitigate the effects of water stress. In the first experiment, seedlings were subjected to flooding, with or without the application of mitigators, and growth, gas exchange, photochemical efficiency, and antioxidant activity were evaluated during stress and after the recovery phase. It was found that flooding significantly compromised the photosynthetic metabolism and growth of untreated seedlings, while the application of mitigators promoted greater maintenance of the photosynthetic rate, recovery of stomatal conductance, and stability of the photosynthetic apparatus. Potassium silicate stood out for promoting structural integrity and photochemical efficiency, while inoculation with *B. subtilis* contributed to morphological and osmotic adjustments, resulting in greater preservation of leaf architecture. In the second experiment, seedlings were subjected to water fluctuation, characterized by alternating water deficit, rehydration, and subsequent flooding, associated or not with the application of potassium silicate and *B. subtilis*. It was observed that the initial water deficit promoted a significant reduction in photosynthetic activity, stomatal closure, and limitation of gas exchange, regardless of the application of mitigators at that time. However, during recovery and subsequent flooding stress, it became evident that the treatments with potassium silicate and bacteria reconfigured the physiological response of the seedlings, conferring greater tolerance to sequential stress. Potassium silicate contributed to membrane stability and reduced dependence on intense enzymatic antioxidant responses, while *B. subtilis* favored osmotic adjustment and biomass maintenance. The activity of antioxidant enzymes revealed a high metabolic cost associated with the history of stress in untreated seedlings, while the mitigators allowed for more balanced and efficient responses. Overall, the results demonstrate that *C. fissilis* is sensitive to variations in water availability, but exhibits high physiological plasticity when subjected to appropriate management strategies. The application of potassium silicate and *B. subtilis* proved efficient in mitigating damage caused by isolated or sequential water stresses, promoting complementary mechanisms of tolerance and recovery. These results reinforce the importance of adopting mitigating practices even in the nursery phase, aiming at the production of more resilient seedlings with greater survival potential in environments subject to water instability.

KEYWORDS: Phenotypic plasticity; Silicon; flooding; water deficit; *Bacillus subtilis*.

1. INTRODUÇÃO GERAL

Cedrela fissilis Vell., comumente conhecida como cedro, é uma espécie arbórea pertencente à família Meliaceae, que pode atingir alturas entre 20 e 35 metros. Sua distribuição natural no Brasil abrange uma ampla faixa, estendendo-se desde o estado do Rio Grande do Sul até Minas Gerais, com registros mais pontuais e isolados nas regiões Norte e Nordeste do país (CASTRO et al., 2018). A espécie apresenta pouca ocorrência em florestas primárias, sendo frequentemente encontrada em ambientes degradados, como pastagens e campos abertos, o que indica sua notável capacidade de colonização e adaptação a ambientes alterados (CAIRES et al., 2011; BINOTTO et al., 2016; SANTOS JÚNIOR et al., 2021). A espécie é característica de matas ciliares, desenvolvendo-se preferencialmente em solos férteis, profundos e bem drenados (CAIRES, et al., 2011; FREIBERGER et al., 2013). *C. fissilis* apresenta padrão de distribuição descontínua em razão da fragmentação dos habitats, mas ainda é encontrada em formações florestais primárias e secundárias, especialmente em Floresta Ombrófila Densa e galerias ripárias (ROCHA et al., 2018).

Além do seu importante papel ecológico, *C. fissilis* possui propriedades medicinais reconhecidas, incluindo atividades antioxidantes, anti-inflamatórias e antitumorais, conforme evidenciado por estudos recentes (NASCIMENTO et al., 2023; ALVES et al., 2025). Do ponto de vista econômico, apresenta potencial madeireiro de alta qualidade, especialmente para móveis e marcenaria fina, além de usos não madeireiros, o que contribuiu para seu atual *status* de espécie ameaçada de extinção (FREIBERGER et al., 2013; PEREIRA et al., 2017; KUINCHTNER et al., 2021).

Ecologicamente, o cedro é caracterizado como uma espécie secundária, que pode atuar tanto em estágios iniciais quanto tardios da sucessão ecológica (VACCARO et al., 1999; PEREIRA et al., 2017). Sua ampla plasticidade fisiológica e ecológica a torna uma candidata ideal para programas de restauração ambiental, incluindo recuperação de áreas degradadas em campos abertos, florestas primárias, matas ciliares e sistemas agroflorestais, contribuindo para a restauração da biodiversidade e melhoria dos serviços ecossistêmicos (CUSATIS et al., 2018; PRADO et al., 2022).

A propagação dessa espécie pode ser realizada por sementes, cuja viabilidade e vigor podem apresentar variabilidade significativa em função da origem e armazenamento, ou por estaquia, que em algumas condições apresenta bons índices de enraizamento (CARVALHO, 2005; PEREIRA et al., 2017; SANTOS et al., 2021).

Os fatores abióticos estressantes constituem elementos do ambiente que limitam o crescimento, desenvolvimento e produtividade das plantas, interferindo em processos fisiológicos, bioquímicos e moleculares essenciais (CRAMER et al., 2011; SCALON et al., 2024). Entre esses fatores, o déficit hídrico e o alagamento destacam-se por seus impactos significativos na produção de mudas e na sobrevivência das plantas. O déficit hídrico, caracterizado pela escassez de água disponível no solo, compromete a absorção radicular, reduzindo o turgor celular e, conseqüentemente, a expansão foliar e o crescimento vegetativo. Em nível fisiológico, a falta de água provoca fechamento estomático para limitar a perda de água por transpiração, o que reduz a fotossíntese e afeta o balanço energético da planta (CAMPOS et al., 2021; SILVÉRIO et al., 2024). Além disso, o déficit hídrico induz acúmulo de espécies reativas de oxigênio (EROs), levando a danos oxidativos em membranas celulares, proteínas e DNA, e ativa respostas antioxidantes endógenas, incluindo enzimas como catalase, peroxidase e superóxido dismutase, que atuam minimizando os efeitos do estresse oxidativo (GARCÍA-CAPARRÓS et al., 2021; SILVÉRIO et al., 2024; SANTOS, 2025).

Por outro lado, o alagamento, definido como a saturação do solo com água, também exerce efeitos negativos sobre as plantas, principalmente devido à limitação de oxigênio disponível nas raízes, condição conhecida como hipóxia ou anóxia radicular (SHARMA et al., 2022). A baixa disponibilidade de oxigênio compromete a respiração celular, reduz a produção de ATP e prejudica a absorção de nutrientes essenciais, levando à desnutrição e ao enfraquecimento das mudas. O alagamento prolongado pode provocar acúmulo de etileno e outros fitormônios relacionadas à senescência, alterações na integridade celular e aumento da susceptibilidade a patógenos do solo (SHARMA et al., 2021; SHARMA et al., 2022).

Tanto o déficit hídrico quanto o alagamento ativam respostas adaptativas nas plantas, incluindo alterações morfológicas, como aumento da densidade radicular ou formação de aerênquimas, e respostas fisiológicas, como a regulação hormonal e o incremento da produção de osmólitos e compostos antioxidantes (VOESENEK et al., 2016; TAIZ et al., 2017; CAMPOS et al., 2021). Essas estratégias visam manter a homeostase celular e assegurar a sobrevivência sob condições adversas.

Na produção de mudas, o manejo adequado do substrato, a utilização de bioestimulantes como o extrato de *Ascophyllum nodosum* e a inoculação com microrganismos promotores de crescimento, como *Bacillus subtilis*, têm se mostrado eficazes na mitigação desses estresses, promovendo maior vigor, desenvolvimento radicular eficiente e maior taxa de sobrevivência pós-transplante (BERNARDES et al., 2023; SANTOS et al., 2023; LUCIANO et al., 2023).

Assim, diante dos desafios provocados por estresses ambientais, o uso de bioestimulantes tem se consolidado como estratégia eficaz para melhorar a resistência e recuperação das plantas. Bioestimulantes atuam como ativadores dos processos fisiológicos e metabólicos, promovendo melhorias morfológicas e fisiológicas que potencializam a tolerância e a recuperação pós-estresse (RÓS et al., 2015; ROSERO et al., 2017; SANTOS et al., 2023; PATEL et al., 2023). Esses bioestimulantes estimulam o desenvolvimento radicular e foliar, aumentam a produção de metabólitos secundários e enzimas antioxidantes, além de favorecerem a colonização radicular por microrganismos benéficos, ampliando a resistência da planta a estresses bióticos e abióticos (CARVALHO & CASTRO, 2014; CREUS et al., 2005; BERNARDES et al., 2023; SANTOS et al., 2024).

O *Ascophyllum nodosum*, uma alga marinha amplamente utilizada como bioestimulante, tem se mostrado uma ferramenta promissora na produção de mudas devido à sua composição rica em fitohormônios, polissacarídeos, aminoácidos, minerais e compostos antioxidantes (BERNARDES et al., 2023; SANTOS et al., 2023; PATEL et al., 2023). Quando aplicado em sementes, mudas ou substratos, o extrato dessa alga promove incremento na germinação e no crescimento inicial das plântulas, estimulando tanto o desenvolvimento radicular quanto o crescimento aéreo, além de favorecer a formação e a eficiência do sistema vascular, o que resulta em maior absorção de água e nutrientes (FERRAZ et al., 2019; SANTOS et al., 2023; PEREIRA et al., 2024). Além de seus efeitos promotores de crescimento, o extrato de *A. nodosum* desempenha papel significativo na mitigação de estresses abióticos, incluindo déficit hídrico, salinidade e variações térmicas. Esses efeitos são mediados por mecanismos fisiológicos e bioquímicos, como a regulação hormonal por auxinas, citocininas e giberelinas, o aumento da atividade de enzimas antioxidantes como catalase, peroxidase e superóxido dismutase, bem como pelo acúmulo de osmólitos, que contribuem para a manutenção do turgor celular (SHUKLA et al., 2019; ALI et al., 2021). Dessa forma, o emprego dessa alga marinha constitui uma estratégia eficiente para a produção de mudas de alta qualidade, promovendo crescimento vigoroso e maior tolerância a estresses ambientais.

Além do extrato de *A. nodosum*, as bactérias promotoras de crescimento (BPCs), como *Bacillus subtilis*, desempenham um papel fundamental na produção de mudas, atuando na promoção do crescimento, na saúde das plantas e na mitigação de estresses abióticos. Esses microrganismos são capazes de colonizar a rizosfera e formar associações simbióticas com as raízes das mudas, produzindo hormônios vegetais como auxinas, citocininas e giberelinas, que estimulam a divisão e alongação celular, promovendo maior desenvolvimento radicular e aéreo (HAMID et al., 2021; ADJEI et al., 2025). Além disso, *B. subtilis* contribui para a

disponibilidade de nutrientes essenciais, como nitrogênio, fósforo e potássio, por meio de processos de fixação biológica, solubilização de fósforo e aumentando a absorção de nutrientes pelas mudas (KUMAR et al., 2012).

Do ponto de vista da mitigação do estresse, *B. subtilis* atua na tolerância a condições adversas, como déficit hídrico, salinidade, variações térmicas e ataques de patógenos, por meio de múltiplos mecanismos (RUZZI & AROCA, 2015; HAMID et al., 2021). Entre eles destacam-se a indução de resistência sistêmica nas plantas, a modulação de respostas antioxidantes, com aumento da atividade de enzimas como catalase, peroxidase e superóxido dismutase, e a produção de osmólitos e exopolissacarídeos, que auxiliam na manutenção do turgor celular e na proteção das raízes (CHANDRASEKARAN & CHUN, 2016; SHUKLA et al., 2022; CHEN et al., 2026). Estudos com mudas de diversas espécies nativas e frutíferas demonstram que a inoculação com *B. subtilis* resulta em maior vigor, incremento da biomassa radicular e aérea, elevada sobrevivência pós-transplante e resistência a fatores abióticos, evidenciando seu potencial como agente bioprotetor para a produção de mudas de qualidade e para a sustentabilidade dos sistemas de viveiro (LUCIANO et al., 2023).

Outra prática agrônômica amplamente adotada é a adubação silicatada, que tem demonstrado efeitos positivos na mitigação de estresses ambientais. O silício contribui para a manutenção do potencial hídrico foliar, preservação dos pigmentos fotossintéticos, regulação do balanço osmótico e fortalecimento das defesas estruturais e bioquímicas da planta, auxiliando na tolerância a secas, salinidade e ataques de patógenos (CAMARGO et al., 2019; BEZERRA et al., 2019; PAULA et al., 2024). Um dos fertilizantes foliares mais utilizados para obtenção de Si, é o silicato de potássio (K_2SiO_3), que combina os benefícios dos dois nutrientes.

O potássio (K) é um macronutriente que possui ação na osmorregulação, transporte de açúcares, regulação potencial da membrana e ativação de várias enzimas (SANYAL et al., 2020; JOHNSON et al., 2022), além de aumentar a economia de água em plantas sob déficit hídrico (FAYYAZ et al., 2013). Mesmo o Si e K sendo recomendados na defesa dos efeitos dos estresses abióticos pelas plantas e contribuírem significativamente reduzindo o nível de EROs (PANDEY E MAHIWAL, 2020), ainda são escassos os trabalhos que estudam a interação entre K, Si, extrato de alga e bactérias promotoras de crescimento em espécies arbóreas submetidas ao estresse por alagamento.

A combinação de bioestimulantes com fertilização silicatada pode potencializar os efeitos benéficos, promovendo maior resiliência das mudas em condições adversas. No entanto, é importante destacar que as respostas da espécie ao uso de bioestimulantes e adubação silicatada podem variar significativamente em função do método de aplicação, dosagem,

frequência, estado fisiológico das plantas e condições ambientais locais. Por isso, é fundamental que tais técnicas sejam adaptadas e otimizadas para as especificidades de *C. fissilis* e das regiões de cultivo.

2. HIPÓTESE

A aplicação de silício, extrato de alga e de *Bacillus subtilis* e crescimento de forma isolada e/ou combinada em mudas de *Cedrela fissilis* Vell submetidas a diferentes níveis de estresse hídrico (baixa disponibilidade hídrica e alagamento) resultará na mitigação dos danos no metabolismo fotossintético, na indução de alterações morfisiológicas, no aumento da atividade antioxidante de proteção (enzimática e não-enzimática), e, conseqüentemente, na promoção do crescimento, melhoria da qualidade e aumento da sobrevivência das mudas, favorecendo a produção de mudas mais vigorosas e tolerantes a condições hídricas adversas.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GERAL

Objetiva-se avaliar o efeito da aplicação do silicato de potássio e extrato de alga e *Bacillus subtilis* na mitigação de danos no metabolismo fotossintético e na indução de alterações morfológicas e antioxidante em mudas de *Cedrela fissilis* Vell, submetidas a diferentes disponibilidades hídricas e o potencial de recuperação dessa espécie.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Caracterizar o crescimento e o desenvolvimento morfológico de mudas de *Cedrela fissilis* submetidas a diferentes disponibilidades hídricas e aos tratamentos com silício, extrato de alga marinha (*Ascophyllum nodosum*) e da bactéria *Bacillus subtilis*, aplicados isoladamente e em combinação.
2. Avaliar o efeito dos tratamentos sobre as trocas gasosas e a eficiência da fluorescência da clorofila *a* durante os períodos de alagamento e déficit hídrico, visando identificar alterações no desempenho fotossintético e na resiliência fisiológica das mudas.
3. Determinar as respostas bioquímicas associadas à atividade enzimática antioxidante (como SOD, POD e Proteína), a fim de compreender o papel dos bioestimulantes na mitigação dos danos oxidativos causados pelos estresses hídricos.
4. Quantificar os efeitos dos tratamentos sobre a biomassa, área foliar e índices de crescimento, verificando possíveis alterações estruturais e morfológicas que indiquem adaptação ou tolerância aos estresses abióticos.
5. Comparar o potencial de recuperação fisiológica e bioquímica das mudas após o reestabelecimento das condições hídricas normais, avaliando o papel dos tratamentos na reversão dos efeitos do alagamento e do déficit hídrico.
6. Investigar interações sinérgicas entre silício, extrato de alga e *Bacillus subtilis*, na promoção de tolerância e recuperação das mudas sob condições contrastantes de disponibilidade hídrica.

4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADJEI, M.O.; YU, R.; CAO, X.; FAN, B. The Mechanisms of *Bacillus subtilis* as a Plant-Beneficial Rhizobacterium in Plant-Microbe Interactions. **Microorganisms**, v. 13, n. 12, p. 2823, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/microorganisms13122823>

ALI, O.; RAMSUBHAG, A.; JAYARAMAN, J. Biostimulant properties of seaweed extracts in plants: Implications towards sustainable crop production. **Plants**, v. 10, n. 3, p. 531, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/plants10030531>

BERNARDES, R.S.; SANTOS, S.C.; SANTOS, C.C.; HEID, D.M.; VIEIRA, M.C.; TORALES, E.P. Ascophyllum nodosum seaweed extract and mineral nitrogen in *Alibertia edulis* seedlings. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 27, n. 3, p. 173-180, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v27n3p173-180>

BINOTTO, B.; ANTONIAZZI, A. P.; NEUMANN, G. M.; SAUSES, T. L.; BUDKE, J. C. Tolerância de plântulas de *Cedrela fissilis* vell. a diferentes amplitudes e intensidades de inundação. **Ciência Florestal**. Santa Maria, v.26, n.4, p. 1339-1348, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/1980509825153>

BEZERRA, B.K.L.; LIMA, G.P.P.; DOS REIS, A.R.; DE ALMEIDA SILVA, M.; DE CAMARGO, M.S. Physiological and biochemical impacts of silicon against water deficit in sugarcane. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 41, n. 12, p. 1-12, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11738-019-2980-0>

CAIRES, S.M.; FONTES, M.P.F.; FERNANDES, R.B.A.; NEVES, J.C.L.; FONTES, R.L.F. Desenvolvimento de mudas de cedro-rosa em solo contaminado com cobre: tolerância e potencial para fins de fitoestabilização do solo. **Revista Árvore**, v. 35, n. 6, p. 1181-1188, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0100-67622011000700004>

CAMARGO, M.S.; BEZERRA, B.K.L.; HOLANDA, L.A.; OLIVEIRA, A.L.; VITTI, A.C.; SILVA, M.A. Silicon fertilization improves physiological responses in sugarcane cultivars grown under deficit water. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 19, n. 1, p. 81-91, 2019. Disponível em; <https://doi.org/10.1007/s42729-019-0012-1>

CAMPOS, A.J.M.; SANTOS, S.M.; NACARATH, I.R.F.F. Estresse hídrico em plantas: uma revisão. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 15, p. e311101523155, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i15.23155>

CARVALHO, M. E. A; CASTRO, P. R. de C. **Extratos de algas e suas aplicações na agricultura**. Piracicaba: ESALQ - Divisão de Biblioteca, 2014. 58 p.(Série Produtor Rural, nº 56).

CARVALHO, P. E. R. **Cedro**. Colombo, PR: Embrapa Florestas, 2005. 17p. (Embrapa florestas. Circular técnica, 113).

CASTRO, M. T. de; MONTALVÃO, S. C. L.; MONNERAT, R. G. Ocorrência de *Hypsipyla grandella* Zeller em Frutos e Sementes de Cedro (*Cedrela fissilis* Vell.) em Brasília. **Floresta e Ambiente**. v.25, n. 1, 4 p., 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2179-8087.133015>

CASTRO KUINCHTNER, C.; SILVA WERTONGE DE OLIVEIRA, G.; MIRANDA DE AGUILAR, M.V.; BERNARDY, D.; BERGER, M.; TABALDI, L.A. Can species *Cedrela fissilis* Vell. be used in sites contaminated with toxic aluminum and cadmium metals? **IForest: Biogeosciences and Forestry**, v. 14, n. 6, p. 508-516, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3832/ifor3890-014>

CHANDRASEKARAN, M.; CHUN, S.C. Expression of PR-protein genes and induction of defense-related enzymes by *Bacillus subtilis* CBR05 in tomato (*Solanum lycopersicum*) plants challenged with *Erwinia carotovora* subsp. *carotovora*. **Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry**, v. 80, n. 11, p. 2277-2283, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/09168451.2016.1206811>

CHEN, Y. H.; LIU, J. Y.; HWANG, S. G.; LIN, Y. H.; HUANG, J. W.; HUANG, T. P. Biofilms of *Bacillus subtilis* as biostimulants for plant resilience to drought and flooding. **Scientific Reports**, v.16, p. 6113 2026. <https://doi.org/10.1038/s41598-026-36767-w>

CRAMER, G.R.; URANO, K.; DELROT, S.; PEZZOTTI, M.; SHINOZAKI, K. Effects of abiotic stress on plants: a systems biology perspective. **BMC Plant Biology**, v. 11, n. 163, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/1471-2229-11-163>

CREUS, C. M.; GRAZIANO, M.; CASANOVAS, E. M.; PEREYRA, M. A.; SIMONTACCHI, M.; PUNTARULO, S.; BARASSI, C. A.; LAMATTINA, L. Nitric oxide is involved in the *Azospirillum brasilense*-induced lateral root formation in tomato. **Planta**. v. 221, n. 2. p. 297-303, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00425-005-1523-7>

CUSATIS, A.C.; MARTINEZ, D.T.; SILVA, L.D.; HIGA, A.R. Survival and growth of *Cedrela fissilis* (Vell.) in mixed species forest plantations. **Scientia Forestalis**, v. 46, n. 119, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.18671/scifor.v46n119.03>

FAYYAZ, P.; ETEMADI, E.; JULAIEE-MANESH, N.; ZOLFAGHARI, R. Sodium and potassium allocation under drought stress in Atlas mastic tree (*Pistacia atlantica* subsp. *mutica*). **iForest-Biogeosciences and Forestry**, v. 6, p. 90, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.3832/ifor0856-006>.

FERRAZ, A.; SILVA, V.N.; RADUNZ, A.L. Condicionamento fisiológico de sementes de chicória com *Ascophyllum nodosum*. **Cultura Agrônômica**, v. 28, n. 2, p. 215-226, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.32929/2446-8355.2019v28n2p215-226>

FREIBERGER, M.B.; GUERRINI, I.A.; GALETTI, G.; FERNANDES, D.M.; CORRÊA, J.C. Crescimento inicial e nutrição de cedro (*Cedrela fissilis* Vell.) em função de doses de nitrogênio. **Revista Árvore**, v. 37, n. 3, p. 385-392, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0100-67622013000300001>

GARCÍA-CAPARRÓS, P.; DE FILIPPIS, L.; GUL, A.; HASANUZZAMAN, M.; OZTURK, M.; ALTAY, V.; LAO, M.T. Oxidative stress and antioxidant metabolism under adverse

environmental conditions: A review. **The Botanical Review**, v. 87, n. 4, p. 421-466, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12229-020-09231-1>

HAMID, B.; ZAMAN, M.; FAROOQ, S.; FATIMA, S.; SAYYED, R.Z.; BABA, Z.A.; SHEIKH, T.A.; REDDY, M.S.; EL ENSHASY, H.; GAFUR, A.; SURIANI, N.L. Bacterial plant biostimulants: A sustainable way towards improving growth, productivity, and health of crops. **Sustainability**, v. 13, n. 5, p. 2856, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su13052856>

JOHNSON, R.; VISHWAKARMA, K.; HOSSEN, M. S.; KUMAR, V.; SHACKIRA, A. M.; PUTHUR, J. T.; ABDI, G.; SARRAF, M.; HASANUZZAMAN, M. Potassium in plants: Growth regulation, signaling, and environmental stress tolerance. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 172, p. 56-69, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2022.01.001>.

KUMAR, A.S.; LAKSHMANAN, V.; CAPLAN, J.L.; POWELL, D.; CZYMMEK, K.J.; LEVIA, D.F.; BAIS, H.P. Rhizobacteria *Bacillus subtilis* restricts foliar pathogen entry through stomata. **The Plant Journal**, v. 72, n. 4, p. 694-706, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2012.05116.x>

LUCIANO, D.O.; LIMA, C.A.; LOPES, M.B.; MOURA, D.M.O.; FERREIRA, A.L.L.; MARTINS, A.L.L.; CHAGAS, L.F.B.; CHAGAS JUNIOR, A.F. *Bacillus* e *Trichoderma* como promotores de crescimento de *Eucalyptus urograndis*. **Research, Society and Development**, v. 12, n. 2, p. e11012239509, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.33448/rsd-v12i2.39509>

MIRANDA ALVES, S.; MAZZEGA LEMOS, M.F.; FEDERIGHI BAISI CHAGAS, E.; MAISTRO, E.L. Efeitos Anti-inflamatórios, Antimicrobianos e Metabólicos do Extrato de *Cedrela fissilis*: Uma Revisão Sistemática. **SciELO Preprints**, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/scielopreprints.12080>

NASCIMENTO, A.B.T.; MONTEIRO, M.F.G.; SOUSA JÚNIOR, D.L.; AQUINO, P.E.A.; SARAIVA, C.R.N.; LEANDRO, M.K.N.S.; SILVA, R.O.M.; LEANDRO, L.M.G. Perfil Químico, Atividade Antibacteriana e Combinada do Extrato Etanólico da Folha e Casca de *Cedrela fissilis* Vell. (Cedro). **Ensaios e Ciência**, v. 26, n. 4, p. 465-469, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.17921/1415-6938.2022v26n4p465-469>

PANDEY, G. K.; MAHIWAL, S. **Role of potassium in plants**. Switzerland: Springer, 2020. 81p.

PATEL, J.S.; SELVARAJ, V.; MORE, P.; BAHMANI, R.; BORZA, T.; PRITHIVIRAJ, B. A plant biostimulant from *Ascophyllum nodosum* potentiates plant growth promotion and stress protection activity of *Pseudomonas protegens* CHA0. **Plants**, v. 12, n. 6, p. 1208, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/plants12061208>

PAULA, E.H.L.; PAULINO, L.R.; SANTOS, C.C.; SILVERIO, J.M.; SCALON, S.P.Q.; VIEIRA, M.C. Potassium silicate and light availability affect photochemical efficiency and morphology of *Alibertia edulis*. **Scientia Agricola**, v. 81, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1678-992x-2023-0006>

PEREIRA, D.; DEOLA, I.A.; SCHUELTER, A.R.; COELHO, S.R.M.; CHRIST, D. Aplicação de extratos de macroalga marrom (*Ascophyllum nodosum*) em sementes de milho condicionadas fisiologicamente sobre a germinação e crescimento inicial de plantas. **Observatório de la Economía Latinoamericana**, v. 22, n. 9, p. e6826, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.55905/oelv22n9-157>

PEREIRA, M.O.; NAVROSKI, M.C.; HOFFMANN, P.M.; GRABIAS, J.; BLUM, C.T.; NOGUEIRA, A.C.; ROSA, D.P. Qualidade de sementes e mudas de *Cedrela fissilis* Vell. em função da biometria de frutos e sementes em diferentes procedências. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 16, n. 4, p. 376-385, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.5965/223811711642017376>

PRADO, M.C.N.; GIULIANI, G.K.F.; GHIOTTO, T.C.; CARMO, J.B.; GUERREIRO, J.C.; PRADO, E.P.; POGETTO, M.H.F.A.D.; MASSON, M.V.; TAVARES, W.S.; WILCKEN, C.F.; ZANUNCIO, J.C.; FERREIRA-FILHO, P.J. Detection and estimation of *Mastigimas anjosi* (Hemiptera: Calophyidae) populations on *Cedrela fissilis* trees. **Royal Society Open Science**, v. 9, n. 3, p. 211340, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1098/rsos.211340>

ROCHA, G.A.; ROMANATTI, P.V.; OLIVEIRA, F.M.; CUNHA NETO, A.R.; PEREIRA, F.J.; POLO, M. Ecophysiology of the tree species *Cedrela fissilis* Vell. (Meliaceae) submitted to flooding. **CERNE**, v. 24, n. 4, p. 323-333, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/01047760201824042525>

RÓS, A.B.; NARITA, N.; ARAÚJO, H.S. Efeito de bioestimulante no crescimento inicial e na produtividade de plantas de batata-doce. **Revista CERES**, v. 62, n. 5, p. 469-474, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0034-737x201562050007>

ROSETO, S.; ERAZO, N.; GUALLPA, M. USIGNA, M. Evaluación de cuatro bioestimulantes y tres sustratos en la propagación de *Vallea stipularis* L.f. **Enfoque UTE**. v.8, n.3, p. 28 – 40, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v8n3.165>

RUZZI, M.; AROCA, R. Plant growth-promoting rhizobacteria act as biostimulants in horticulture. **Scientia Horticulturae**, v. 196, p. 124-134, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.08.042>

SANTOS, C.C.; BELTRAMIN, F.A.; SILVA, W.C.; SILVERIO, J.M.; SCALON, S.P.Q.; SOUZA, F.H.; HOLSBAQUE, V.G.; JANSE, R.A.L. Hydrogel alleviates the stressful effect drought in *Schinus terebinthifolia* and helps with post-stress recovery. **Brazilian Journal of Biology**, v. 85, p. e289691, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1519-6984.289691>

SANTOS, C.C.; OLIVEIRA, M.L.; RIBEIRO, D.M.; SCALON, S.P.Q.; LINNÉ, J.A.; SILVERIO, J.M.; FIGUEIREDO, V.M.A.; SILVA, O.H.M. Organic residues and *Parachlorella* microalgae favor the growth and gas exchange of cedar. **Scientia Agricola**, v. 81, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1678-992x-2023-0077>

SANTOS, C.C.; SILVA, A.A.S.; CARVALHO DE OLIVEIRA, C.H.; SILVERIO, J.M.; SANTOS DIAS, A.; LINNÉ, J.A.; SCALON, S.P.Q.; ALOVISI, A.M.T. *Ascophyllum nodosum* seaweed extract in *Inga edulis* seedlings under drought and the potential of phenotypic plasticity. **Journal of Applied Phycology**, v. 35, n. 6, p. 3123-3135, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10811-023-03094-w>

SANTOS JUNIOR, C.F.; RECH, T.D.; NAVROSKI, M.C.; BOFF, P.; BOFF, M.I.C. Vegetative rescue of *Cedrela fissilis* Vell. by the rooting of cuttings from epicormic and canopy sprouts. **Ciência Rural**, v. 51, n. 8, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20200775>

SANYAL, S. K.; RAJASHEKER, G.; KISHOR, P. K.; KUMAR, S. A.; KUMARI, P. H.; SARITHA, K. V.; RATHNAGIRI, P.; PANDEY, G. K. Role of protein phosphatases in signaling, potassium transport, and abiotic stress responses. **Protein phosphatases and stress management in plants: Functional genomic perspective**, p. 203-232, 2020.

SCALON, S.P.Q.; SANTOS, C.C.; BADIANI, M.; TABALDI, L.A. Editorial: Abiotic stress in plants: sustainability and productivity. **Frontiers in Plant Science**, v. 15, p. 1386174, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1386174>

SHARMA, S.; BHATT, U.; SHARMA, J.; KALAJI, H.M.; MOJSKI, J.; SONI, V. Ultrastructure, adaptability, and alleviation mechanisms of photosynthetic apparatus in plants under waterlogging: A review. **Photosynthetica**, v. 60, n. 3, p. 430-444, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.32615/ps.2022.033>

SHARMA, S.; SHARMA, J.; SONI, V.; KALAJI, H.M.; ELSHEERY, N.I. Waterlogging tolerance: A review on regulative morpho-physiological homeostasis of crop plants. **Journal of Water and Land Development**, p. 16-28, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.24425/jwld.2021.137092>

SHUKLA, P.S.; MANTIN, E.G.; ADIL, M.; BAJPAI, S.; CRITCHLEY, A.T.; PRITHIVIRAJ, B. Ascophyllum nodosum-based biostimulants: Sustainable applications in agriculture for the stimulation of plant growth, stress tolerance, and disease management. **Frontiers in Plant Science**, v. 10, p. 655, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00655>

SHUKLA, V.; KUMAR, S.; TRIPATHI, Y.N.; UPADHYAY, R.S. Bacillus subtilis- and Pseudomonas fluorescens-Mediated Systemic Resistance in Tomato Against Sclerotium rolfsii and Study of Physio-Chemical Alterations. **Frontiers in Fungal Biology**, v. 3, p. 851002, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/ffunb.2022.851002>

SILVÉRIO, J.M.; SANTOS, J.K.V.; SILVA, M.S.; SCALON, S.P.Q.; SANTOS, C.C.; REIS, L.C.; LINNÉ, J.A. Does hydrogel help in the mitigation and recovery of *Eugenia myrcianthes* Nied. under water stress? **Revista Caatinga**, v. 37, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1983-21252024v37i2000rc>

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6.ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 888 p.

VACCARO, S.; LONGHI, S. J.; BRENA, D. A. Aspectos da composição florística e categorias sucessionais do extrato arbóreo de três subseres de uma floresta estacional decidual, no Município de Santa Tereza - RS. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.9, n.1, p.1-18, 1999. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/19805098360>

VOESENEK, L.A.C.J.; SASIDHARAN, R.; VISSER, E.J.W.; BAILEY-SERRES, J. Flooding stress signaling through perturbations in oxygen, ethylene, nitric oxide and light. **The New Phytologist**, v. 209, n. 1, p. 39-43, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/nph.13775>

CAPÍTULO I: SILICATO DE POTÁSSIO, EXTRATO DE ALGA E *Bacillus subtilis* NO CRESCIMENTO, METABOLISMO FOTOSSINTÉTICO E ANTIOXIDANTE DAS MUDAS DE *Cedrela fissilis* Vell., SOB ALAGAMENTO.

RESUMO

Cedrela fissilis Vell. é uma espécie florestal nativa de elevada importância ecológica e amplamente indicada para programas de restauração e reflorestamento. Entretanto, ainda são limitados os estudos que avaliam suas respostas fisiológicas ao estresse por alagamento associadas ao uso de estratégias mitigadoras. Assim, este trabalho teve como objetivo avaliar as respostas morfofisiológicas, bioquímicas e antioxidantes de mudas de *C. fissilis* submetidas ao alagamento, bem como seu potencial de recuperação, considerando a aplicação de silicato de potássio, extrato de alga marinha (*Ascophyllum nodosum*) e *Bacillus subtilis* de forma isolada ou combinada. As mudas foram cultivadas sob irrigação contínua (controle) e alagamento (por 8 dias), com ou sem a aplicação dos mitigadores, distribuídas nos seguintes tratamentos: T1 - controle irrigado; T2 - controle estressado; T3 - silicato de potássio (K_2SiO_3); T4 - B₁; T5 - B₂; T6 - B₁ + K_2SiO_3 ; T7 - B₂ + K_2SiO_3 ; T8 - ExtA₁; T9 - ExtA₂; T10 - ExtA₁ + K_2SiO_3 ; e T11 - ExtA₂ + K_2SiO_3 . Foram avaliadas variáveis relacionadas às trocas gasosas, eficiência fotoquímica, metabolismo antioxidante, crescimento e qualidade das mudas durante o período de estresse e após a recuperação. O alagamento comprometeu significativamente o metabolismo fotossintético e o crescimento das mudas não tratadas, evidenciando a sensibilidade da espécie à hipoxia radicular. A aplicação dos mitigadores promoveu ajustes fisiológicos importantes, resultando em maior manutenção da atividade fotossintética, maior estabilidade do aparato fotossintético e recuperação após o estresse. O silicato de potássio isolado destacou-se por favorecer a integridade estrutural e a eficiência fotoquímica, o extrato de *A. nodosum* isolado contribuiu para a ativação de respostas metabólicas associadas à tolerância ao estresse, e *B. subtilis* isolado auxiliou em ajustes morfológicos e osmóticos. De modo geral, os resultados demonstram que o uso dessas estratégias mitigadoras são eficientes para reduzir os efeitos negativos do alagamento e potencializar a recuperação fisiológica de mudas de *C. fissilis*, reforçando a importância do manejo ainda na fase de viveiro para a produção de mudas mais resilientes.

PALAVRAS CHAVES: Plasticidade fenotípica, cedro-rosa, silício

CHAPTER I: POTASSIUM SILICATE, ALGAE EXTRACT AND *Bacillus subtilis* IN THE GROWTH, PHOTOSYNTHETIC METABOLISM AND ANTIOXIDANT ACTIONS OF *Cedrela fissilis* Vell. SEEDLINGS UNDER FLOODING.

ABSTRACT

Cedrela fissilis Vell. is a native forest species of high ecological importance and widely indicated for restoration and reforestation programs. However, studies evaluating its physiological responses to flooding stress associated with the use of mitigation strategies are still limited. Thus, this work aimed to evaluate the morphophysiological, biochemical, and antioxidant responses of *C. fissilis* seedlings subjected to flooding, as well as their recovery potential, considering the application of potassium silicate, seaweed extract (*Ascophyllum nodosum*), and *Bacillus subtilis*, alone or in combination. Seedlings were grown under continuous irrigation (control) and flooding (for 8 days), with or without the application of mitigation agents, distributed in the following treatments: T1 - irrigated control; T2 - stressed control; T3 - potassium silicate (K_2SiO_3); T4 - B₁; T5 - B₂; T6 - B₁ + K_2SiO_3 ; T7 - B₂ + K_2SiO_3 ; T8 - ExtA₁; T9 - ExtA₂; T10 - ExtA₁ + K_2SiO_3 ; and T11 - ExtA₂ + K_2SiO_3 . Variables related to gas exchange, photochemical efficiency, antioxidant metabolism, growth, and seedling quality were evaluated during the stress period and after recovery. Flooding significantly compromised the photosynthetic metabolism and growth of untreated seedlings, highlighting the species' sensitivity to root hypoxia. The application of mitigators promoted important physiological adjustments, resulting in greater maintenance of photosynthetic activity, greater stability of the photosynthetic apparatus, and recovery after stress. Isolated potassium silicate stood out for promoting structural integrity and photochemical efficiency, isolated *A. nodosum* extract contributed to the activation of metabolic responses associated with stress tolerance, and isolated *B. subtilis* aided in morphological and osmotic adjustments. Overall, the results demonstrate that the use of these mitigating strategies is efficient in reducing the negative effects of flooding and enhancing the physiological recovery of *C. fissilis* seedlings, reinforcing the importance of management during the nursery phase for the production of more resilient seedlings.

KEYWORDS: Phenotypic plasticity; rosewood (*Cedrela fissilis*); silicon.

1. INTRODUÇÃO

A produção de mudas florestais de qualidade é etapa crítica para o sucesso de projetos de restauração, reflorestamento e sistemas agroflorestais, sendo a integridade fisiológica das plantas jovens um determinante da sobrevivência e do estabelecimento no campo (PIAO et al., 2019; LINNÉ et al., 2023). *Cedrela fissilis* Vell. é uma espécie de relevância ecológica e econômica na Mata Atlântica e em áreas ripárias do Brasil, frequentemente utilizada em programas de recuperação ambiental (ROCHA et al., 2018; SANTOS JÚNIOR et al., 2021). Entretanto, sua propagação e estabelecimento podem ser comprometidos por estresses abióticos, dentre os quais o alagamento temporário e o déficit hídrico se destacam por afetarem diretamente a fotossíntese, a troca gasosa e o balanço redox das mudas (CAMPOS et al., 2021; SCALON et al., 2024). Estudos recentes demonstram que *C. fissilis* apresenta estratégias anatômicas e fisiológicas para tolerância a períodos curtos de alagamento, porém a resposta é fortemente dependente do estado fisiológico inicial das mudas e das condições de viveiro, o que reforça a necessidade de práticas de produção que incrementem resistência e resiliência desde a fase de muda (SANTOS et al., 2024).

Nos últimos anos tem-se ampliado o interesse pelo uso de insumos que modulam a fisiologia vegetal, entre eles, o silício (Si), potássio (K), extratos de algas marinhas, como da *Ascophyllum nodosum*, e como *Bacillus subtilis*, como estratégias para melhorar o crescimento, a eficiência fotossintética e a capacidade antioxidante de plantas sujeitas a estresses abióticos (CAMARGO et al., 2019; ALI et al., 2021; BERNARDES et al., 2023; ADJEI et al., 2025). Esses insumos atuam por via foliar e/ou rizosférica e podem atuar de forma complementar. O silício atua tanto estruturalmente (fortalecendo paredes celulares) quanto fisiologicamente (melhorando relações hídricas e correção estomática) (FIGUEIREDO et al., 2023; PAULA et al., 2024). Os extratos de *A. nodosum* fornecem compostos bioativos (fitohormônios, osmolitos e aminoácidos) que modulam sinais de estresse e metabolismo, e a *B. subtilis* favorece a colonização rizosférica, produção de fitohormônios, aumenta a absorção de nutrientes e a indução de respostas sistêmicas de resistência (HAMID et al., 2021; SANTOS et al., 2023; BERNARDES et al., 2023).

O silício, embora não seja considerado um nutriente essencial para a maioria das espécies, tem sido consistentemente relacionado à mitigação de estresses hídricos, salinos e de hipóxia radicular, por meio de múltiplos mecanismos: manutenção da integridade de membranas, regulação das trocas gasosas, incluindo aumento da condutância estomática sob condições específicas, melhoria na eficiência fotossintética e redução da peroxidação lipídica

via modulação do sistema antioxidante enzimático e não-enzimático (QUEIROZ et al., 2018; LINNÉ et al., 2022; FIGUEIREDO et al., 2023). Revisões e estudos experimentais, como de Zanetti et al. (2016) e de Yang et al. (2025), reforçam que aplicações foliares ou via substrato de fontes de silício podem aumentar a capacidade de assimilação de carbono e a estabilidade do fotossistema II em plantas jovens submetidas a estresse hídrico, o que é particularmente relevante para mudas que enfrentarão condicionantes de campo como alagamentos intermitentes.

O potássio, desempenha papel central na fisiologia vegetal, atuando como regulador osmótico, ativador enzimático e elemento-chave na manutenção do potencial hídrico celular. Sua adequada disponibilidade contribui para o controle da abertura e fechamento estomático, favorecendo o uso eficiente da água e a manutenção da fotossíntese sob condições adversas (SANYAL et al., 2020; SARDANS e PEÑUELAS, 2021; JOHNSON et al., 2022). Em situações de estresse abiótico, como seca, salinidade, altas temperaturas e déficit hídrico, o K auxilia na estabilização de membranas celulares, na redução de perdas de água por transpiração excessiva e no equilíbrio iônico, além de favorecer a translocação de fotoassimilados. Ademais, o potássio está associado à atenuação do estresse oxidativo, ao contribuir indiretamente para a eficiência dos sistemas antioxidantes, reduzindo os danos causados por espécies reativas de oxigênio e, conseqüentemente, promovendo maior tolerância e resiliência das plantas frente a condições ambientais limitantes (PANDEY E MAHIWAL, 2020; JOHNSON et al., 2022).

Extratos de *Ascophyllum nodosum* (ANE) ganharam espaço como bioestimulantes em viveiros por conterem uma mistura complexa de fitormônios (auxinas, citocininas), derivados fenólicos, aminoácidos e polissacarídeos capazes de modular crescimento, enraizamento e respostas antioxidantes (BERNARDES et al., 2023; PATEL et al., 2023). Evidências recentes indicam que aplicações foliares de ANE melhoram índices morfofisiológicos (área foliar, relação folha/raiz) e elevam a atividade de enzimas antioxidantes sob distintos estresses abióticos, promovendo recuperação mais rápida da fotossíntese após reestabelecimento das condições hídricas (LINNÉ, 2024). Além disso, o ANE apresenta ação sinérgica com outros insumos (nutrientes e microrganismos), potencializando efeitos protetores em plantas jovens (BERNARDES et al., 2023; PATEL et al., 2023).

As bactérias promotoras de crescimento vegetal, e em particular *Bacillus subtilis*, mostram-se promissoras na produção de mudas por dois mecanismos principais: promoção direta do crescimento via produção de fitohormônios (auxinas, giberelinas, etc), fixação ou solubilização de nutrientes e melhora da arquitetura radicular; e indução de resistência sistêmica e melhoria da microbiota rizosférica, que pode reduzir efeitos adversos de hipóxia e patógenos

oportunistas durante e após períodos de alagamento (RUZZI E AROCA, 2015; HAMID et al., 2021; SHUKLA et al., 2022). Revisões recentes destacam que inoculações com *Bacillus* podem reduzir danos oxidativos e auxiliar a manutenção da atividade fotossintética sob estresse, embora a resposta seja dependente do método de aplicação, cepa e interação com o substrato do viveiro (LUCIANO et al., 2023).

Apesar dos inúmeros trabalhos sobre os efeitos individuais de Si, K, ANE e BPC, ainda existem algumas questões que precisam ser respondidas, como a falta de estudos integrados que avaliem a combinação de aplicações foliares entre silício, potássio e/ou extratos de algas com inoculações rizosféricas de *B. subtilis*. Além disso, precisamos monitorar respostas morfofisiológicas (crescimento e biomassa), parâmetros fotossintéticos (trocas gasosas, eficiência de Fotossistema II) e as fases críticas de estresse, como a fotossíntese zero sob alagamento e o processo de recuperação pós-alagamento. Investigar essas interações é particularmente relevante para produção de mudas destinadas a áreas sujeitas a enchentes temporárias, onde acelerar a recuperação fisiológica e reduzir mortalidade inicial são objetivos centrais de manejo.

Diante desse contexto, o presente trabalho propõe avaliar o efeito isolado e combinado de Silicato de potássio (K_2SiO_3) e extratos de *Ascophyllum nodosum* (ANE) aplicados por via foliar e inoculações de *Bacillus subtilis* via solo sobre o crescimento, o metabolismo fotossintético e a capacidade antioxidante de mudas de *Cedrela fissilis* submetidas a alagamento e o potencial de recuperação das mudas após a suspensão do estresse.

2. MATERIAL E MÉTODOS

As mudas de *Cedrela fissilis* Vell. utilizadas no experimento foram produzidas no viveiro da Universidade Federal da Grande Dourados, a partir de sementes de frutos maduros coletados em área remanescente de Cerrado (Autorização de Acesso e de Remessa de Amostra de Componente do Patrimônio Genético nº 010220/2015-1 – CNPq/CGEN/MMA), no Estado de Mato Grosso do Sul.

A semeadura foi realizada em tubetes de 50 x 190 mm preenchidos com Latossolo Vermelho Distroférrico (LVd) (SANTOS et al., 2025) de textura argilosa e areia na proporção de 1:1, no Viveiro de Plantas da UFGD, coberto por telado preto de *nylon* com 70% de sombreamento. Posteriormente ao atingirem a altura de 10 cm, as mudas foram transplantadas para vasos com capacidade de 8kg, contendo LVd e areia grossa (3:1), sendo transplantadas 2 mudas por vaso.

Aos 30 dias após o transplante, os vasos foram levados para o ambiente com 30% de sombreamento onde permaneceram por 45 dias para aclimação. Durante todo tempo do experimento, houve controle de plantas daninhas de forma manual e regas diárias de acordo com a necessidade da espécie.

Aos 60 dias após o transplante das mudas (DAT), foi realizada a adubação nitrogenada na dose de 50 mg kg⁻¹ de solo, utilizando-se ureia (40% de N) como fonte. Para minimizar as perdas por volatilização, a ureia foi previamente dissolvida em água e a solução aplicada diretamente ao solo, com o auxílio de um bastão de vidro.

Os tratamentos foram constituídos pela aplicação isolada e combinada de silicato de potássio, extrato de alga marinha e *Bacillus subtilis*. Foi utilizada uma dose de silicato de potássio (0,84 g L⁻¹ de K₂SiO₃), duas concentrações do extrato de alga *Ascophyllum nodosum* (ExtA₁ = 15 mL L⁻¹ e ExtA₂ = 30 mL L⁻¹) e duas concentrações da bactéria *B. subtilis* (B₁ = 5 mL L⁻¹ e B₂ = 10 mL L⁻¹) e as combinações dos tratamentos com extrato, bactérias e silicato de potássio, resultando em 11 (onze) tratamentos: T1- controle irrigado (sem estresse e sem aplicação de bioestimulantes); T2 - controle estressado (submetido à condição de alagamento, sem aplicação de produtos); T3 – silicato de potássio (0,84 g L⁻¹ de K₂SiO₃); T4 - B₁ (*B. subtilis*, 5 mL L⁻¹); T5 - B₂ (*B. subtilis*, 10 mL L⁻¹); T6 - B₁ + K₂SiO₃; T7 - B₂ + K₂SiO₃; T8 - ExtA₁ (15 mL L⁻¹ de *A. nodosum*); T9 - ExtA₂ (30 mL L⁻¹ de *A. nodosum*); T10 - ExtA₁ + K₂SiO₃; e T11 - ExtA₂ + K₂SiO₃.

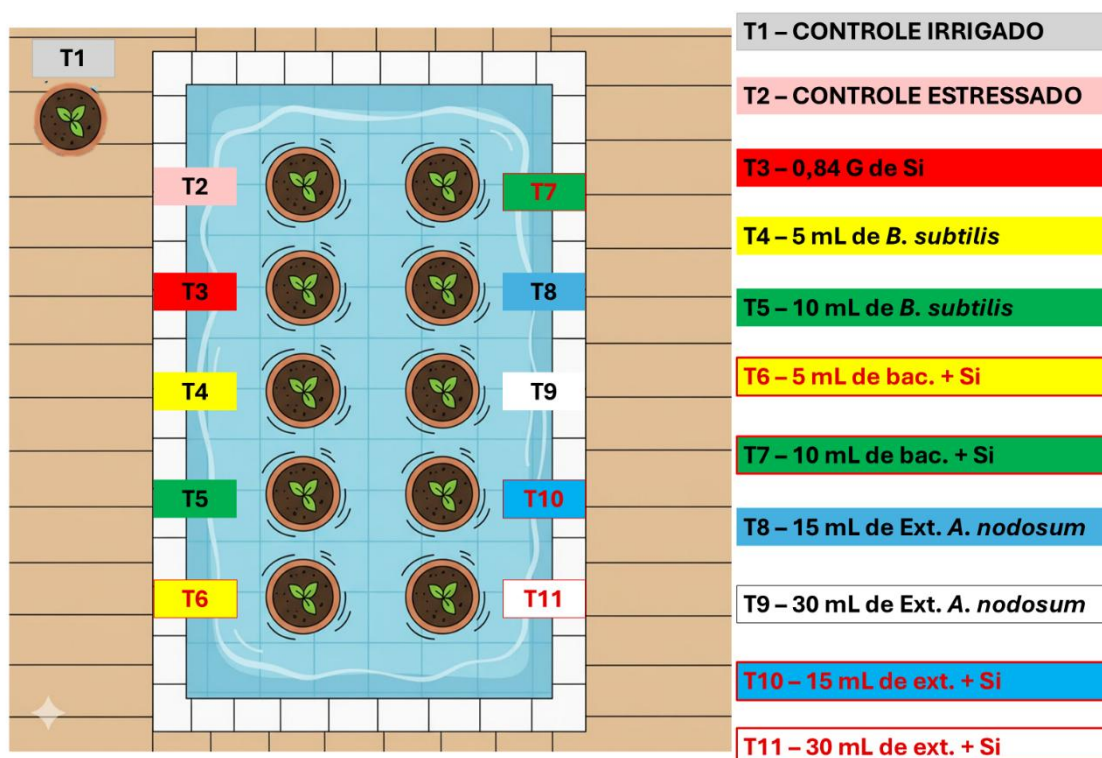


FIGURA 1. Esquema de representação dos tratamentos durante a fase de alagamento. Cada tratamento foi composto por oito vasos com 2 mudas cada. As cores representadas no esquema correspondem as cores que foram adotadas para identificação no campo.

Aos 65 DAT, a *B. subtilis* foi aplicada via solo, de acordo com seu mecanismo de colonização rizosférica e promoção do crescimento radicular. A bactéria *Bacillus* foi obtida a partir do produto comercial SoluBio Raiz Performance®, e apresenta 1×10^8 Unidades Formadoras de Colônias (UFC) por mL⁻¹. A inoculação consistiu na perfuração do solo a aproximadamente 10 cm de profundidade, utilizando um bastão de vidro, ao lado do caule de cada muda, seguida da inoculação do volume correspondente do produto biológico diretamente no orifício. Em seguida, o furo foi cuidadosamente fechado com o próprio substrato, garantindo o contato do inoculante com a zona radicular e evitando a exposição do microrganismo à luz solar ou à dessecação.

As aplicações de silicato de potássio e do extrato de alga foram realizadas aos 70 DAT, via pulverização foliar, utilizando-se um pulverizador costal, calibrado para proporcionar uma nebulização fina e uniforme sobre toda a superfície foliar, com as seguintes características: Pulverizador costal pressurizado com CO₂ à pressão constante de 41 PSI, acoplado a uma barra de aplicação de dois metros, composta de quatro pontas tipo leque (Jacto AXI – 110-02) regulado para vazão de 200 L ha⁻¹. O procedimento foi conduzido nas primeiras horas da

manhã, sob condições ambientais favoráveis (temperatura amena e baixa velocidade do vento), a fim de maximizar a absorção foliar e reduzir perdas por evaporação ou deriva. A fonte de silicato de potássio adotada foi o fertilizante foliar que contém 12% de Si e 15% de K₂O. Para o preparo da calda, foram adicionados 2,0 mL de adjuvante LI 700 visando facilitar a aderência do K₂SiO₃ na superfície foliar.

De acordo com o fabricante, o extrato de alga *Ascophyllum nodosum* utilizado, conhecido comercialmente por Acadian®, é composto por: N (0,8 - 1,5%); P (1-2%); K (17-22%); Ca (0,3-0,6%); Mg (0,2-0,5%); S (1-2%); B (75-150 ppm); Cu (1-5 ppm); Fe (75-250 ppm); Mn (5-20 ppm); Zn (25-50 ppm) e Na (3-5%); hidróxido de potássio, com 61,48 g L⁻¹ de K₂O; 69,60 g L⁻¹ de carbono orgânico total; pH 8,0 e uma densidade de 1,16 g dm⁻³.

A aplicação de *Bacillus subtilis* foi realizada dez dias antes da submissão das mudas ao alagamento, visando proporcionar tempo suficiente para o estabelecimento da colonização rizosférica e a indução de respostas fisiológicas associadas à promoção do crescimento e ao aumento da tolerância ao estresse abiótico. As aplicações foliares de silicato de potássio e do extrato de alga *Ascophyllum nodosum* foram realizadas cinco dias antes da submissão das mudas ao alagamento, período considerado suficiente para a ativação de mecanismos fisiológicos e bioquímicos relacionados à tolerância ao estresse.

Após a caracterização das mudas (T0 – quadro 1 e 2), quanto a trocas gasosas e crescimento, elas foram submetidas ao alagamento controlado. O alagamento das mudas foi realizado aos 75 DAT, com os tratamentos T2 a T11, conforme o delineamento experimental, permanecendo o tratamento T1 (controle irrigado) sob condições de 70-80% de Capacidade de Retenção de Água (CRA) (SOUZA et al., 2000). O alagamento consistiu na imersão dos vasos em piscina plástica contendo lâmina de água de aproximadamente 5 cm acima da base do caule, de modo a manter o sistema radicular completamente submerso. Os vasos dos tratamentos com *B. subtilis* foram mantidos em piscina separada, para que não houvesse contaminação nos vasos sem aplicação da bactéria.

QUADRO 1. Caracterização inicial (T0) das mudas de *C. fissilis* em relação à taxa fotossintética líquida (A), eficiência de carboxilação da Rubisco - (A/C_i), condutância estomática (g_s), concentração interna de CO_2 (C_i), eficiência do uso de água (A/E), eficiência quântica potencial do FSII (F_v/F_m) e área foliar (AF).

Rep.	A ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	A/C_i ($\mu\text{mol mol}^{-1}$)	g_s ($\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	C_i ($\text{mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	A/E	F_v/F_m	AF (cm^2)
1	4,17	0,01695	0,035	246	5,278	0,642	1.015,00
2	3,94	0,01955	0,055	201,5	4,635	0,707	724,42
3	3,72	0,01441	0,040	258	5,027	0,674	869,48

QUADRO 2. Caracterização inicial (T0) das mudas de *C. fissilis* em relação índice de qualidade Dickson (IQD), superóxido dismutase em parte aérea (SOD pa), superóxido dismutase em raízes (SOD ra), peroxidase em parte aérea (POX pa), peroxidase em raízes (POX ra), proteína em parte aérea (PROT pa) e proteína em raízes (PROT ra).

Rep.	IQD	SOD pa ($\mu\text{g MF}^{-1}$)	SOD ra ($\mu\text{g MF}^{-1}$)	POX pa ($\mu\text{mol mg}^{-1} \text{prot min}^{-1}$)	POX ra ($\mu\text{mol mg}^{-1} \text{prot min}^{-1}$)	PROT pa ($\text{mg g}^{-1} \text{MF}^{-1}$)	PROT ra ($\text{mg g}^{-1} \text{MF}^{-1}$)
1	2,607	32,86771	34,02807	0,017859	0,016637	48,6832	47,0204
2	2,728	23,74592	33,34028	0,016224	0,01564	67,38975	47,99037
3	2,353	29,73425	35,42174	0,016341	0,018414	53,81018	45,17284

As avaliações foram realizadas quando a taxa fotossintética das mudas de algum dos tratamentos sob estresse alcançou valor próximo a zero (F0), o que ocorreu no oitavo dia de alagamento (83 DAT). Nesse momento, procedeu-se à retirada das mudas da piscina, sendo 50% das plantas colhidas para análises laboratoriais e as demais separadas para drenagem do excesso de água, irrigada na mesma CRA das plantas controle e monitoradas até a recuperação da taxa fotossintética, isto é, até que alcançassem valores próximos ao das mudas controle (REC) (Quadro 3).

QUADRO 3. Fases e dias após o transplântio (DAT) de mudas de *C. fissilis* submetidas ao alagamento.

Fase	Dias após o transplântio (DAT)
Semeadura	-
Transplântio	0 DAT
Aclimação em 30%	45 DAT
Adubação nitrogenada	60 DAT
Inoculação das bactérias	65 DAT
Aplicação do ANE e do K_2SiO_3	70 DAT
Alagamento	75 DAT
Fim do alagamento (F0) /início da REC	83 DAT
Fim da REC	120 DAT

Foram avaliadas as seguintes características:

A) Trocas gasosas: realizadas com um analisador de gás infravermelho (IRGA) modelo LCIPro - SD ADC BioScientific Ltd., obtendo os seguintes parâmetros: taxa fotossintética líquida - A ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), condutância estomática - g_s ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), taxa de transpiração - E ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), concentração interna de CO_2 - C_i ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$) e eficiência de carboxilação da Rubisco - A/C_i ($\mu\text{mol } \mu\text{mol mol}^{-1}$). As avaliações foram realizadas no período da manhã, entre 8 e 11h, selecionando folhas do terço médio das mudas, completamente expandidas e previamente marcadas, de modo que todas as medições fossem sempre realizadas nas mesmas folhas. As leituras ocorreram com valor de radiação fotossinteticamente ativa de $223 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ sob 30% de sombreamento.

B) Parâmetros da fluorescência da clorofila *a*: avaliados com um fluorômetro portátil modelo OS-30p (Opti-Sciences Chlorophyll Fluorometer, Hudson, USA). Os parâmetros obtidos foram: Fluorescência inicial - F_0 , eficiência quântica potencial do FSII - F_v/F_m , rendimento quântico efetivo de conversão de energia fotoquímica no FSII - F_v/F_0 e produção quântica basal dos processos não fotoquímicos no FSII - F_0/F_m . A determinação da fluorescência foi realizada entre 8 e 11h da manhã, nas mesmas folhas utilizadas para as avaliações das trocas gasosas, as quais foram submetidas a um período de 30 minutos de adaptação ao escuro com o auxílio de cliques adaptadores, para que todos os centros de reação nessa região foliar alcançassem a condição de “aberto”, ou seja, oxidação completa do sistema fotossintético de transporte de elétrons.

C) Índice de clorofila - IC: avaliado com um medidor portátil de clorofila (modelo SPAD-502, Minolta Camera Co. Ltd.) e realizado nos limbos medianos das mesmas folhas das avaliações de trocas gasosas e fluorescência.

D) Qualidade das mudas: Determinou-se a área foliar das mudas utilizando um integrador de área foliar ((LI-COR, 3100 C – Area Meter, Nebraska – USA), e os dados biomassa fresca e seca com a utilização de uma balança de precisão e posteriormente os dados foram utilizados para determinação da massa seca total (MST), relação altura/diâmetro (RAD) e massa seca da parte aérea/raiz (RPAR), em que foi calculado o índice de qualidade de Dickson segundo a equação $IQD = \left[\frac{MST}{RAD+RPAR} \right]$ (Dickson et al., 1960).

E) Atividade enzimática antioxidante: Amostras das folhas e raízes foram congeladas em nitrogênio líquido. De cada amostra foi pesado 1 g para ser macerado em 6 mL de solução contendo 0,3 g de polivinilpirrolidona (PVP) diluído em 100 mL de tampão fosfato de potássio (0,2 M), realizando-se a centrifugação a 4000 rpm por 20 minutos. O sobrenadante foi utilizado como extrato enzimático para determinação da atividade da superóxido dismutase (GIANNOPOLITIS e REIS, 1977) e peroxidase (BROETTO et al., 2014), utilizando espectrofotômetro para leitura das amostras. Para a quantificação de proteínas totais, adotou-se a metodologia de Bradford (1976), em que amostras frescas do material foram utilizadas na preparação do extrato. As leituras das absorbâncias foram realizadas em triplicatas no comprimento de onda de 595 nm, utilizando espectrofotômetro (Metash Visible Spectrophotometer - model V5000).

QUADRO 4: Atributos químicos do solo após aplicação dos tratamentos em diferentes épocas de avaliação após colheita das mudas de *C. fissilis*, em Dourados -MS.

Trat./Época		pH	P	Ca	K	Mg	Al	H+Al	SB	V
		CaCl ₂	mg dm ³	-----mmol _c dm ⁻³ -----						%
1	Alag.	4,82	2,99	7,82	0,12	2,63	0,24	3,66	10,58	0,079
	Rec.	4,77	3,20	7,40	0,13	2,30	0,24	5,20	9,85	0,063
2	Alag.	4,8	3,50	7,34	0,11	2,35	0,24	3,91	9,82	0,068
	Rec.	4,72	3,70	7,69	0,11	2,46	0,24	5,09	10,27	0,069
3	Alag.	4,84	3,20	8,76	0,12	3,01	0,12	4,16	11,90	0,079
	Rec.	4,71	3,20	6,76	0,10	2,02	0,24	5,04	8,90	0,057
4	Alag.	4,77	3,20	9,24	0,11	3,23	0,24	4,39	12,59	0,098
	Rec.	4,73	3,60	8,50	0,11	2,76	0,24	5,20	11,38	0,061
5	Alag.	4,78	3,20	7,32	0,11	2,42	0,24	4,63	9,86	0,082
	Rec.	4,69	4,51	7,45	0,12	2,23	0,24	4,99	9,82	0,052
6	Alag.	4,78	5,53	7,35	0,12	2,41	0,24	4,68	9,88	0,075
	Rec.	4,77	3,80	7,93	0,11	2,48	0,24	5,04	10,53	0,084
7	Alag.	4,66	4,17	7,36	0,19	2,43	0,24	5,31	9,99	0,078
	Rec.	4,67	3,50	8,12	0,11	2,85	0,24	5,04	11,10	0,070
8	Alag.	4,78	3,40	6,09	0,10	2,07	0,24	5,15	8,27	0,049
	Rec.	4,67	3,09	6,83	0,10	2,14	0,24	4,63	9,09	0,045
9	Alag.	4,76	3,30	6,30	0,10	1,93	0,12	5,15	8,35	0,052
	Rec.	4,68	3,20	6,53	0,10	2,00	0,24	4,53	8,64	0,035
10	Alag.	4,73	2,69	6,73	0,11	2,11	0,24	5,04	8,96	0,055
	Rec.	4,64	4,01	8,32	0,12	2,54	0,24	4,58	11,00	0,039
11	Alag.	4,81	3,40	7,73	0,11	2,48	0,24	5,26	10,33	0,055
	Rec.	4,64	4,31	8,29	0,11	2,50	0,24	4,44	10,92	0,075

- Delineamento experimental e análise de dados

Para cada época, o experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado (DIC), com 11 tratamentos e quatro repetições e cada unidade experimental constituída por duas mudas por vaso. Os dados foram submetidos à análise de variância e quando significativos, as médias foram comparadas pelo teste de Scott-Knott, à 5% de probabilidade. O programa estatístico utilizado foi o SISVAR 5.6 (FERREIRA, 2010).

3. RESULTADOS

Todas as características avaliadas nas mudas apresentaram efeito significativo dos tratamentos, exceto F_v/F_m , proteína e SOD da parte aérea e da raiz, na F0. E , C_i , IQD, POX na raiz, na REC.

Na F0, a taxa fotossintética (A) das mudas alagadas tratadas com silicato de potássio (K_2SiO_3) manteve-se maior e não variou significativamente das mudas controle (Figura 2A). Ressalta-se que, as mudas tratadas com ambas as doses de bactéria *Bacillus subtilis* (T4 e T5) e as duas doses do extrato de alga *Ascophyllum nodosum* (ANE) associadas com K_2SiO_3 (T10 e T11) apresentaram A superior às demais mudas alagadas. Na REC, as mudas tratadas com K_2SiO_3 , ambas as doses de bactéria e a menor dose de ANE (15 mL L^{-1}) (T3, T6, T7 e T8, respectivamente) recuperaram a A com valores superiores ao das mudas controle e demais tratamentos (Figura 2B).

Para a condutância estomática (g_s), as mudas controle (T1) apresentaram em F0 as maiores médias, diferindo significativamente dos demais tratamentos. Destaca-se que as mudas do tratamento Ext 1 + K_2SiO_3 (T10) exibiram médias intermediárias de g_s ($0,0266\text{ mol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$) (Figura 2C). Em REC, observou-se que os tratamentos T5, T6, T7 e T8 apresentaram médias de g_s , significativamente superiores, enquanto nos demais tratamentos não diferiram entre si. Além disso, verificou-se um aumento geral da condutância estomática na REC quando comparada ao F0, com recuperação parcial da atividade estomática após o período de estresse (Figura 2D).

As mudas do tratamento 4 (T4), correspondente à aplicação de bactéria na dose de 5 mL L^{-1} , apresentaram em F0 médias significativamente superiores de concentração interna de CO_2 (C_i) em comparação aos demais tratamentos (Figura 2E). Entretanto, na fase de recuperação (REC), as diferenças entre os tratamentos não foram significativas (Figura 2F).

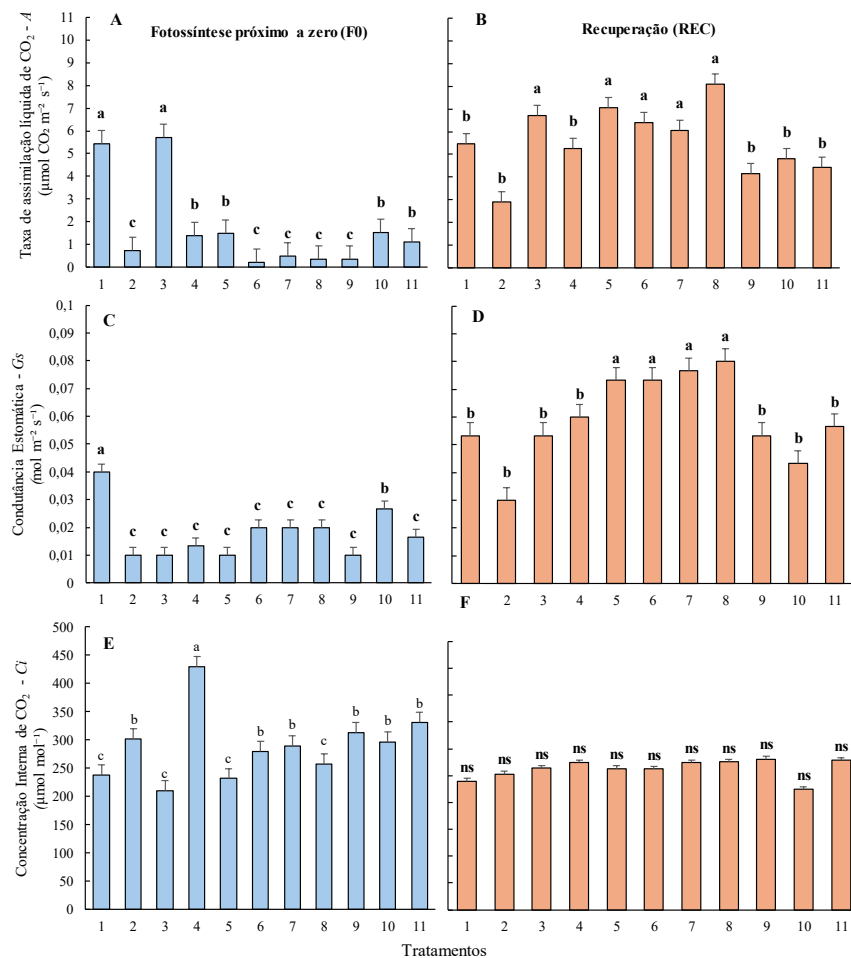


FIGURA 2. Taxa de assimilação líquida de CO₂ (A) em fotossíntese próximo a zero – F0 (A) e em recuperação – REC (B), condutância estomática (gs) em fotossíntese próximo a zero – F0 (C) e em recuperação - REC (D), concentração interna de CO₂ (Ci) em fotossíntese próximo a zero – F0 (E) e em recuperação – REC (F) em mudas de *C. fissilis* cultivadas com diferentes tratamentos. Letras minúsculas iguais não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p \geq 0,05$); ns: não-significativo.

As análises de eficiência de carboxilação da rubisco (A/C_i) evidenciaram que, em F0, as mudas do tratamento 3 (T3), com aplicação apenas de silicato de potássio, apresentaram a maior média, diferindo significativamente dos demais. No tratamento controle irrigado (T1) observa-se o segundo maior valor em F0, enquanto nos demais tratamentos as menores eficiências (Figura 3A). Na fase de recuperação (REC), os tratamentos 1, 3, 5, 6, 7, 8 e 10 apresentaram as maiores médias, indicando desempenho superior as condições de estresse. De maneira geral, observou-se um aumento das médias de A/C_i em REC para todos os tratamentos (Figura 3B).

Para a eficiência do uso de água (A/E), observou-se que, em F0, o tratamento 3 (T3), com aplicação de silicato de potássio, proporcionou a maior média (Figura 3C). Na fase de recuperação (REC), as mudas do tratamento controle (T1) apresentaram o maior valor,

enquanto T2 e T3 valores intermediários (Figura 3D). Assim, enquanto em F0 houve ampla variação entre os tratamentos, em REC as diferenças ocorreram apenas entre T1, T2 e T3.

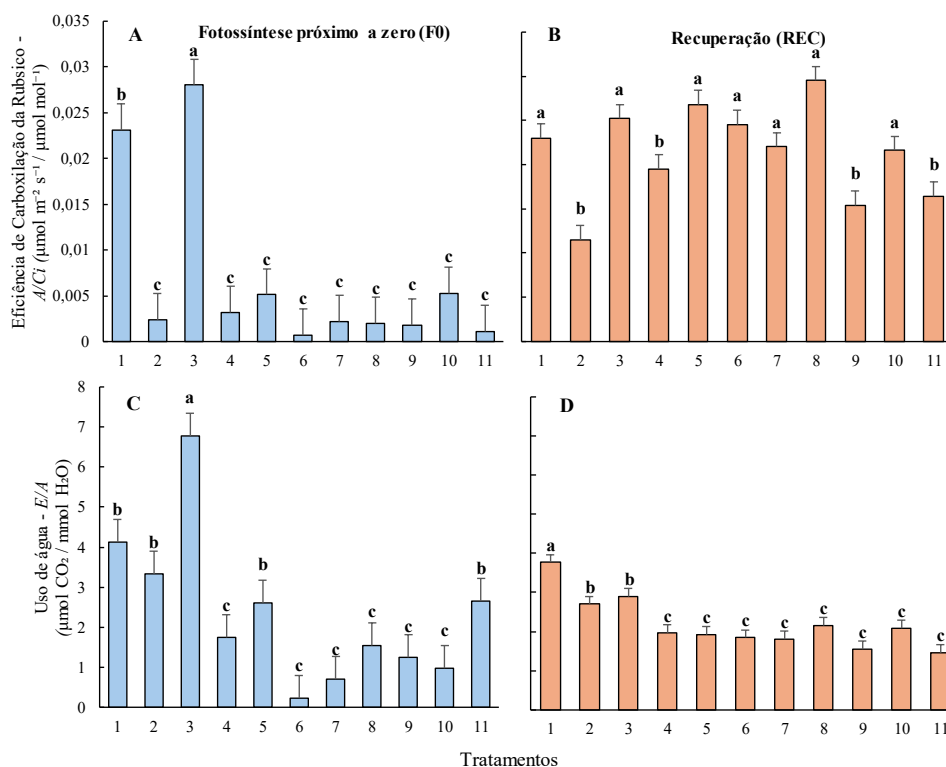


FIGURA 3. Eficiência de carboxilação da rubisco (A/C_i) em fotossíntese próximo a zero – F0 (A) e em recuperação – REC (B), eficiência do uso de água (E/A) em fotossíntese próximo a zero – F0 (C) e em recuperação – REC (D) em mudas de *C. fissilis* cultivadas com diferentes tratamentos. Letras minúsculas iguais não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p \geq 0,05$); ns: não-significativo.

As mudas do tratamento T9 ($\text{ExtA}_2 + \text{K}_2\text{SiO}_3$) apresentaram a maior área foliar (AF) ($825,86 \text{ cm}^2$) em F0. Os tratamentos com apenas extrato de alga T5 (ExtA_2) e bactéria T6 ($\text{B}_1 - 5 \text{ mL L}^{-1}$) e T7 ($\text{B}_2 - 10 \text{ mL L}^{-1}$) também mantiveram uma AF significativamente alta, indicando que extrato de alga em dose alta e a bactéria (ambas as doses) foram muito eficientes isoladamente para área foliar (Figura 4A).

Em REC, as mudas dos tratamentos T11, T3, T6 e T7 apresentaram as maiores médias, todos com K_2SiO_3 , isolado ou combinado (Figura 4B). Destaca-se a média do T3 (com K_2SiO_3), quando comparamos no F0 com REC.

O índice de qualidade Dickson foi maior nos tratamentos T5, T6, T8, T9, T10, assemelhando-se significativamente ao T1 (controle), em F0 (Figura 4C). Para REC, não houve diferença significativa entre os tratamentos (Figura 4D).

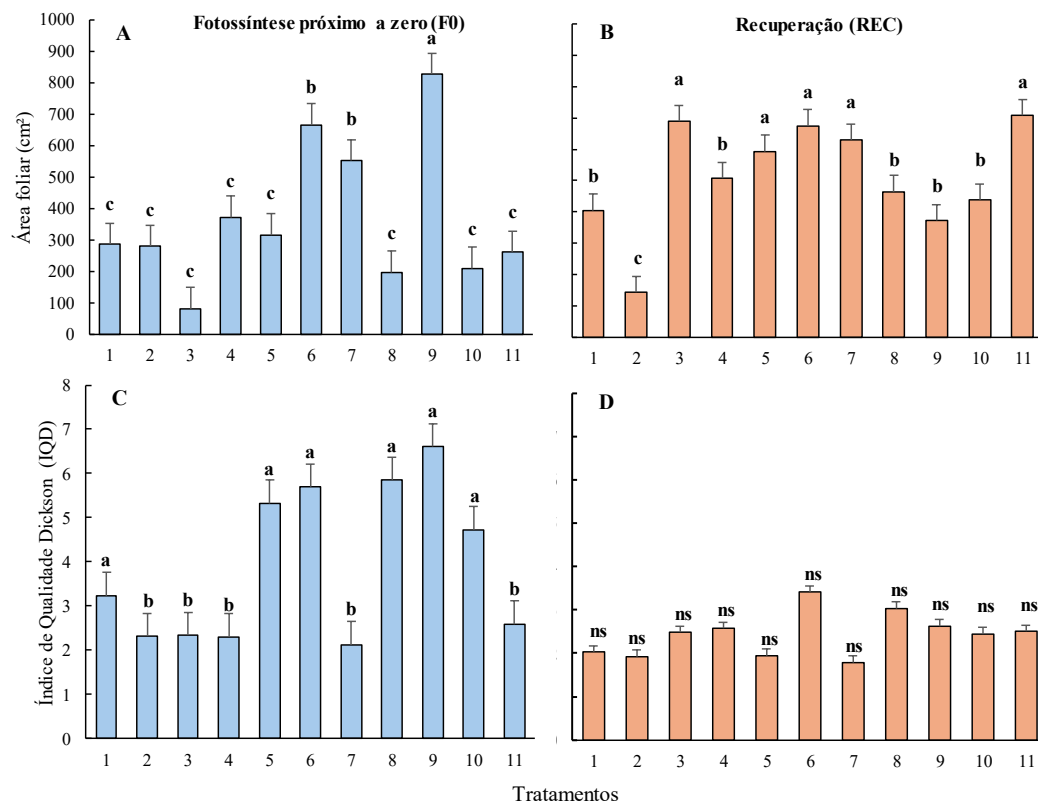


FIGURA 4. Área foliar (AF) em fotossíntese próximo a zero – F0 (A) e em recuperação – REC (B), índice de qualidade dickson (IQD) em fotossíntese próximo a zero – F0 (C) e em recuperação - REC (D) em mudas de *C. fissilis* cultivadas com diferentes tratamentos. Letras minúsculas iguais não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p \geq 0,05$); ns: não-significativo.

Não houve diferença significativa entre os tratamentos de F0 para atividade de superóxido dismutase na raiz (SOD ra) (Figura 5A). Em REC, a atividade de SOD ra foi maior nas mudas do tratamento T1 (controle) e menor no T2 (estressado sem aplicação) (Figura 5B). Para atividade da peroxidase da parte aérea (POX pa), em F0, os valores foram maiores nas mudas dos tratamentos T3, T8 e T9, sendo tratadas com K_2SiO_3 de forma isolada, e 15 e 30 mL L^{-1} de ANE, respectivamente. As mudas de T2 (estressado sem aplicação) apresentaram os menores valores em F0 (Figura 5C). Em REC, a atividade da POX pa foi maior nas mudas do T1 e do T3, mostrando que as mudas tratadas com K_2SiO_3 de forma isolada mantiveram-se no nível das mudas controle (T1) (Figura 5D). Para a atividade da peroxidase na raiz em F0, os maiores valores foram registrados nas mudas do tratamento estressado sem aplicação (T2) (Figura 5F) e para REC, não houve diferença significativa entre os tratamentos (Figura 5E).

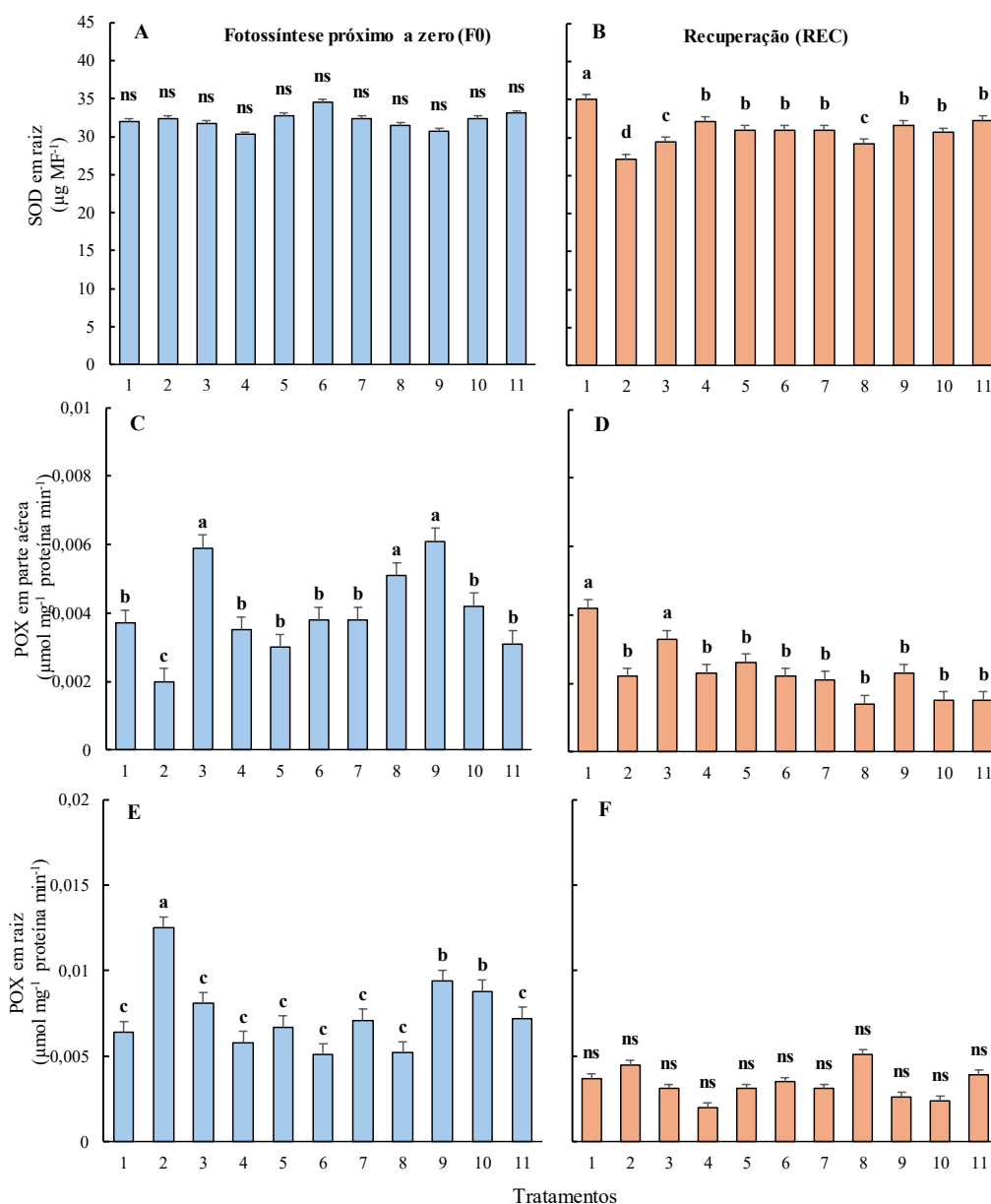


FIGURA 5. Atividade da superóxido dismutase (SOD) de raiz em fotossíntese próximo a zero – F0 (A) e em recuperação – REC (B), atividade da peroxidase (POX) da parte aérea em fotossíntese próximo a zero – F0 (C) e em recuperação - REC (D), atividade da peroxidase (POX) de raízes em fotossíntese próximo a zero – F0 (E) e em recuperação – REC (F) em mudas de *C. fissilis* cultivadas com diferentes tratamentos. Letras minúsculas iguais não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p \geq 0,05$); ns: não-significativo.

Com relação aos teores de proteínas totais, não houve diferença significativa entre os tratamentos em parte aérea e raiz, tanto em F0 quanto em REC (Figura 6A, 6C). Os maiores teores de proteínas na parte aérea foram verificados nos tratamentos T4, T6, T8 e T11, sendo as mudas tratadas com 5 mL L^{-1} de bactéria de forma isolada, 5 mL L^{-1} de BCP + K_2SiO_3 , 15 mL L^{-1} de ANE e 30 mL L^{-1} de ANE+ K_2SiO_3 , respectivamente, em REC (Figura 6B). Nas raízes, os teores de proteínas totais ficaram maiores no T2 (estressado sem aplicação), enquanto

o menor valor foi registrado nas mudas do tratamento controle (T1), ambos na REC (Figura 6D).

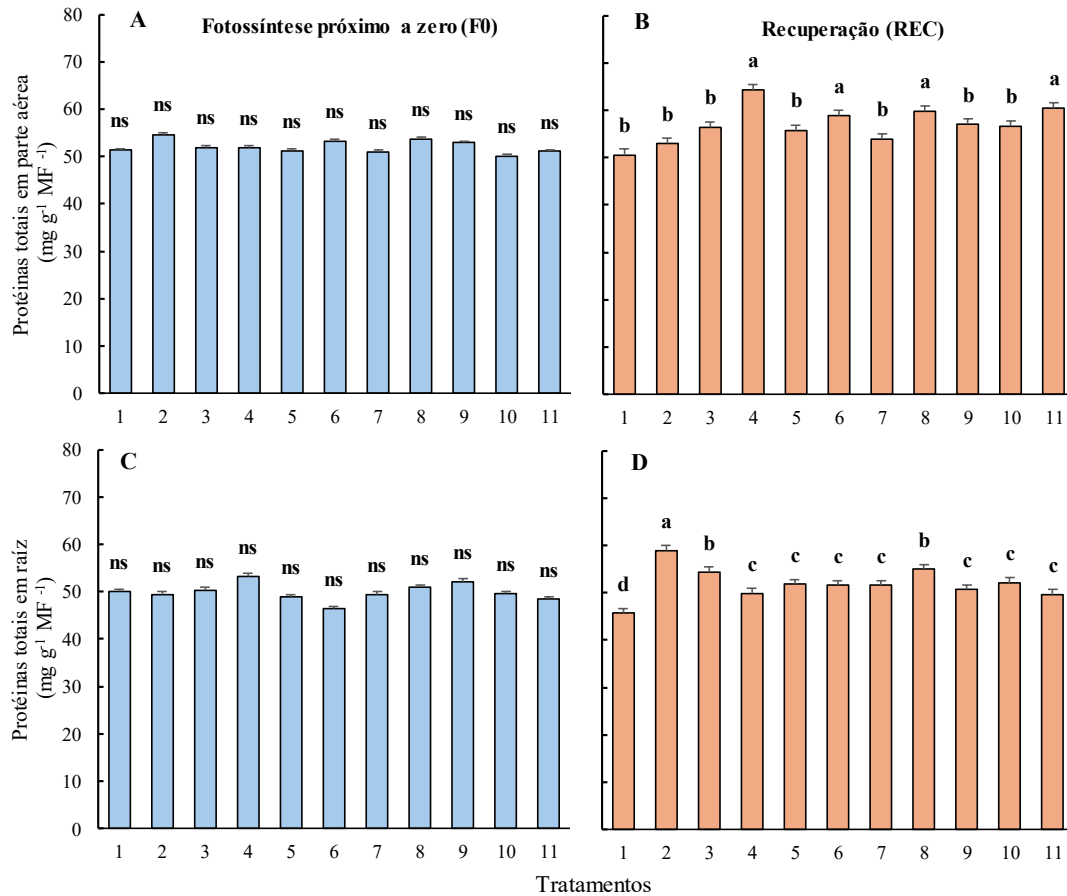


FIGURA 6. Proteínas totais da parte aérea (PROT pa) em fotossíntese próximo a zero – F0 (A) e em recuperação – REC (B), proteínas totais em raízes (PROT ra) em fotossíntese próximo a zero – F0 (C) e em recuperação - REC (D) em mudas de *C. fissilis* cultivadas com diferentes tratamentos. Letras minúsculas iguais não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p \geq 0,05$); ns: não-significativo.

4. DISCUSSÃO

O alagamento induz hipóxia ou anóxia radicular, levando a uma rápida sinalização de estresse que culmina no fechamento estomático (g_s) e, conseqüentemente, na redução da taxa fotossintética. A recuperação (REC) após o período de estresse reflete a persistência dos efeitos dos bioestimulantes no longo prazo. Os tratamentos T3 (K_2SiO_3), T6 ($B_1 + K_2SiO_3$), T7 ($B_2 + K_2SiO_3$) e T8 (ExtA₁) apresentaram taxa fotossintética superior ao controle e aos demais tratamentos.

A literatura destaca o Si e K como mitigadores de estresses abióticos, principalmente hídrico e salino (ZANETTI et al., 2016; KIM et al., 2017; JOHNSON et al., 2022; YANG et al., 2025). Sob alagamento, o Si pode atuar melhorando a absorção de nutrientes ou reduzindo o estresse oxidativo nas raízes e atenuando respostas negativas na parte aérea (SANTOS et al., 2022; FORESTI et al., 2024). Considerando que muitas características de trocas gasosas observados para *C. fissilis* nesta pesquisa foram maiores na fase de REC comparados à F0, esses resultados sugerem que o silício é mais eficaz na recuperação metabólica do que na proteção inicial, conforme observado por Foresti et al. (2024). Além disso, o ANE e as bactérias, sendo bioestimulantes, promovem a síntese proteica e a reativação do aparato fotossintético (como a atividade da RuBisCO) mais rapidamente que o controle estressado (T2), um efeito amplamente reportado em outros trabalhos com uso de bioestimulantes (RUZZI E AROCA, 2015; SHUKLA et al., 2019).

A redução geral da condutância estomática (g_s) em todos os tratamentos sob estresse de alagamento em comparação ao T1 (controle irrigado) é a resposta fisiológica esperada ao alagamento (SHARMA et al., 2021). Os valores de g_s intermediária nas mudas do tratamento T10 (ExtA₁ + K_2SiO_3) sugere uma regulação estomática mais branda ou tardia, possivelmente devido à mitigação de estresse pela combinação dos componentes (SHARMA et al., 2022), ressaltando que o aumento geral da g_s na REC demonstra a retomada da atividade estomática. Os tratamentos T5, T6, T7 e T8 com maiores g_s são aqueles que tiveram ANE ou bactérias. Estes agentes, via modulação de ácido abscísico (ABA) e citocininas, aceleram a abertura estomática e o reestabelecimento das trocas gasosas, maximizando a assimilação de CO₂ e o crescimento (SANTANIELLO et al., 2017; CARNIETTO et al., 2025).

Apesar da A alta, o K_2SiO_3 isolado (T3) teve uma AF baixa em F0, diferindo do controle irrigado (T1). Isso sugere que, embora o Si mantenha a eficiência bioquímica das folhas, ele não previne efetivamente a abscisão foliar induzida pelo estresse, que é um mecanismo morfológico de aclimação ao alagamento, em que ocorre o “descarte” de órgãos

que que demandam muita energia (REHMAN et al., 2022). Os tratamentos T9 (ExtA₂), T6 e T7 (B₁+ K₂SiO₃ e B₂ + K₂SiO₃), tiveram AF superior. O extrato de alga é rico em fitormônios (auxinas, citocininas) e aminoácidos, e a *B. subtilis* (BPC) atuam ativamente na divisão celular e na modulação hormonal, evitando a senescência precoce e a perda de AF, comuns na aclimação ao alagamento e favorecendo a sobrevivência (CHANDRASEKARAN E CHUN, 2016; ALI et al., 2021; SHUKLA et al., 2022). O extrato de alga em dose alta é o tratamento mais eficaz na proteção da área foliar durante o pico do estresse. Ele supera todas as combinações e os tratamentos isolados com bactéria. Isso enfatiza que os fito-hormônios e nutrientes orgânicos presentes no ANE (em especial a citocinina) são o principal fator que inibe a abscisão foliar induzida pelo alagamento em *C. fissilis* (SHUKLA et al., 2019; SANTANIELLO et al., 2017). Os resultados confirmam que as mudas tratadas com silicato de potássio (T3), que apresentam uma AF baixa em F0, sugerem que o silício é um excelente promotor de crescimento compensatório na recuperação, junto com as combinações de bactéria + K₂SiO₃ (T6 e T7) e ExtA₂ + K₂SiO₃ (T11). Isso reforça a hipótese de que o Si não atua na prevenção, mas sim na aceleração da síntese de novos tecidos após o fim do estresse (FORESTI et al. 2024).

As mudas do T4 (*B. subtilis* - 5 mL L⁻¹) foram as únicas a apresentar concentração interna de CO₂ (*C_i*) significativamente superior. Em condições de estresse, valores elevados de *C_i* combinados com baixa *g_s* indicam limitação fotossintética de natureza não estomática, associada à redução da atividade da RuBisCO e do transporte de elétrons. A *B. subtilis*, contudo, pode melhorar o estado hídrico e nutricional das plantas e modular sinais hormonais, favorecendo a manutenção da turgescência foliar e da condutância estomática, resultando em maior *C_i* mesmo sob estresse. (HAMID et al., 2021; CARNIETTO et al., 2025). O fato de a *C_i* não ter apresentado diferença significativa em REC sugere que o aparato bioquímico foliar retornou a um estado funcional similar em todos os tratamentos.

A eficiência de carboxilação (*A/C_i*) reflete a atividade da enzima RuBisCO e, portanto, a capacidade da planta de fixar CO₂ de forma eficiente. As mudas do tratamento T3 (silicato de potássio isolado) apresentaram a maior média de *A/C_i* em F0 quando comparadas às mudas controle (T1), que apresentaram a segunda maior média, mostrando que a ausência de estresse permite alta eficiência e que o silício e o potássio têm potencial de mitigar o estresse. Este é um resultado que complementa o achado anterior de que a taxa fotossintética do T3 permaneceu alta. Isso sugere que, apesar de o Si e K não ter prevenido a perda de área foliar (baixa AF), eles foram eficazes na manutenção da integridade e funcionalidade da RuBisCO sob anoxia radicular (SANTOS et al., 2022; ORAEE et al., 2023). O aumento generalizado de *A/C_i* em

REC é esperado, pois o alívio do estresse permite a reativação da RuBisCO (SHARMA et al., 2021). O fato de T3, T5, T6, T7, T8 e T10 terem apresentado as maiores médias sugere que o extrato de alga e bactérias, juntamente com o K_2SiO_3 , são os mais eficientes em promover a regeneração ou síntese de novas enzimas RuBisCO, no mesmo patamar que T1 (controle irrigado). Os fito-hormônios do extrato de algas (ANE) e os metabólitos das bactérias (BPC) estimulam o crescimento e o reparo celular, incluindo a síntese proteica (SANTANIELLO et al., 2017; SHUKLA et al., 2022; BERNARDES et al., 2023).

A eficiência do uso de água (A/E) é a razão entre a assimilação de CO_2 (A) e a transpiração (E), indicando o quanto de carbono é fixado por unidade de água perdida (SILVÉRIO et al., 2024a). O T3 (silicato de potássio isolado) proporcionou às mudas a maior média de A/E em F0. Este resultado, juntamente com a alta A/C_i em T3, indica uma estratégia de tolerância ao estresse hídrico/anóxico via otimização não estomática (ZHU et al., 2019). O mesmo encontrado por Santos et al (2022), em que a aplicação de 2 mmol de Si favoreceu a regulação da condutância estomática (g_s) e transpiração (E), refletindo em maior A/E em mudas de *Eugenia myrcianthes*. Considerando que na REC, o T1 (controle irrigado) manteve-se no patamar de F0, a variação ampla entre os tratamentos em F0 confirma que os bioestimulantes modificaram a estratégia hídrica da planta sob estresse. Fayyaz et al. (2013) também encontrou que mudas de pistache (*Pistacia atlantica* subsp. *Mutica*) com aplicação de K, permitiu maior economia de água pelas plantas em situação de déficit hídrico, relacionando positivamente o teor de K da parte aérea com o teor de água na parte aérea.

A maior atividade da POX na parte aérea nos tratamentos com silicato de potássio isolado (T3) e nas combinações com extrato de alga (T8 e T9) reforça o papel desses elementos como ativadores do sistema de defesa antioxidante (SHUKLA et al., 2019; AL-MOKADEM et al., 2023). Ao atuar como um 'imunizante bioquímico', o Si prepara a planta contra o estresse oxidativo, o que é fundamental para preservar o aparato fotossintético e manter a elevada A/C_i via eficiência da RuBisCO (ZHU et al., 2019). A falha em induzir a SOD na raiz sugere que o estresse de alagamento pode ter inibido o metabolismo celular radicular de forma tão severa que a síntese enzimática foi prejudicada, ou o tempo que as mudas estiveram alagadas (8 dias) não foi o suficiente para aumentar a atividade da enzima (VOESENEK et al., 2016). Essa ausência de indução da SOD contrasta fortemente com o dado de que a atividade da peroxidase (POX raiz) foi maior no T2 (controle estressado) em F0. Isso indica que a defesa antioxidante da raiz sob alagamento não dependeu da SOD, mas sim da POX, que atua na degradação de peróxido de hidrogênio (H_2O_2) (RAJPUT et al., 2021). O fato de a SOD na raiz não ter aumentado nos tratamentos com bioestimulantes sugere que o silicato de potássio, o extrato de

alga e a bactéria mitigaram o estresse oxidativo nas raízes de *C. fissilis* via ativação preferencial da POX.

Os tratamentos com extrato de alga e bactéria (T5, T4, T6, T7, T8, T9, T10) mantêm a qualidade das mudas (IQD alto), confirmando o efeito positivo desses bioestimulantes na biomassa e na arquitetura da muda (HAMID et al., 2021; BERNARDES et al., 2023). Os maiores teores de proteínas em REC, T4, T6, T8, T11 (extrato de alga e bactéria, isolados ou com K_2SiO_3) confirmam o papel dos compostos orgânicos e microrganismos como promotores da síntese proteica, crucial para o reparo e crescimento foliar.

5. CONCLUSÃO

A mitigação do estresse de alagamento em *C. fissilis* reside na combinação dos bioestimulantes. O extrato de *Ascophyllum nodosum* e *Bacillus subtilis* fornecem a proteção morfológica (qualidade das mudas) e a reativação metabólica rápida, enquanto o silicato de potássio assegura a eficiência bioquímica sob estresse e o crescimento compensatório durante a recuperação. Especificamente, a aplicação de bactérias (5 e 10 mL) e extrato de alga (15 e 30 mL), combinados com o K_2SiO_3 , oferece o regime mais completo para garantir tanto a sobrevivência sob estresse quanto a recuperação eficiente da qualidade da muda.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADJEI, M. O.; YU, R.; CAO, X.; FAN, B. The mechanisms of *Bacillus subtilis* as a plant-beneficial rhizobacterium in plant-microbe interactions. **Microorganisms**, v. 13, n. 12, p. 2823, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/microorganisms13122823>.

ALI, O.; RAMSUBHAG, A.; JAYARAMAN, J. Biostimulant properties of seaweed extracts in plants: implications towards sustainable crop production. **Plants**, v. 10, n. 3, p. 531, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/plants10030531>.

AL-MOKADEM, A. Z.; SHETA, M. H.; MANCY, A. G.; HUSSEIN, H.-A. A.; KENAWY, S. K. M.; SOFY, A. R.; ABU-SHAHBA, M. S.; MAHDY, H. M.; SOFY, M. R.; AL BAKRY, A. F.; AGHA, M. S. Synergistic effects of kaolin and silicon nanoparticles for ameliorating deficit irrigation stress in maize plants by upregulating antioxidant defense systems. **Plants**, v. 12, n. 11, p. 2221, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/plants12112221>.

BERNARDES, R. da S.; SANTOS, S. C.; SANTOS, C. C.; HEID, D. M.; VIEIRA, M. do C.; TORALES, E. P. *Ascophyllum nodosum* seaweed extract and mineral nitrogen in *Alibertia edulis* seedlings. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 27, n. 3, p. 173–180, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v27n3p173-180>.

BRADFORD, M. M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. **Anal Biochem**, v. 72, p. 248-254, 1976.

BROETTO, F. **Métodos de trabalho em bioquímica vegetal e tecnologia de enzimas**. Botucatu: IBB Cultura, 2014. 92p.

CAMARGO, M. S.; BEZERRA, B. K. L.; HOLANDA, L. A.; OLIVEIRA, A. L.; VITTI, A. C.; SILVA, M. A. Silicon fertilization improves physiological responses in sugarcane cultivars grown under water deficit. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 19, n. 1, p. 81–91, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s42729-019-0012-1>.

CAMPOS, A. J. de M.; SANTOS, S. M.; NACARATH, I. R. F. F. Estresse hídrico em plantas: uma revisão. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 15, e311101523155, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i15.23155>.

CARNIETTO, M. R. A.; LUIZ SANTOS, H.; FERREIRA, L. de S.; SILVA, G. F. da; ALMEIDA SILVA, M. de. Soil texture affects the efficiency of *Bacillus subtilis* and *Bacillus licheniformis* in the physiological and biochemical modulation of sugarcane tolerance to water deficit. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 225, p. 109997, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2025.109997>.

CHANDRASEKARAN, M.; CHUN, S. C. Expression of PR-protein genes and induction of defense-related enzymes by *Bacillus subtilis* CBR05 in tomato plants challenged with *Erwinia carotovora* subsp. *carotovora*. **Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry**, v. 80, n. 11, p. 2277–2283, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/09168451.2016.1206811>.

DICKSON, A.; LEAF, A.; HOSNER, J.F. Quality appraisal of white spruce and white pine seedling stock in nurseries. **Forestry Chronicle**, v. 36, p. 10-13, 1960.

FAYYAZ, P.; ETEMADI, E.; JULAIEE-MANESH, N.; ZOLFAGHARI, R. Sodium and potassium allocation under drought stress in *Pistacia atlantica* subsp. *mutica*. **iForest – Biogeosciences and Forestry**, v. 6, n. 2, p. 90–94, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.3832/ifor0856-006>.

FERREIRA, D. F. **Programa de análises estatísticas (Statistical Analysis Software) e planejamento de Experimentos – SISVAR 5.3**. Lavras: UFLA, 2010.

FIGUEIREDO, V. M. de A.; SCALON, S. de P. Q.; SANTOS, C. C.; LINNÉ, J. A.; SILVERIO, J. M.; CERQUEIRA, W. M.; ALMEIDA, J. L. da C. S. de. Do silicon and salicylic acid attenuate water deficit damage in *Talisia esculenta* Radlk seedlings? **Plants**, v. 12, n. 18, p. 3183, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/plants12183183>.

FORESTI, A. C.; PAULA QUINTÃO SCALON, S. de; SANTOS, C. C.; REIS, L. C.; LINNÉ, J. A. Does silicon in *Eugenia myrcianthes* seedlings under water stress contribute to tolerance and recovery? **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 24, n. 2, p. 2208–2220, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s42729-024-01664-6>.

GIANNGIOPOLITIS, I.; REIS, S. K. Superoxide dismutases: I. Occurrence in higher plants. **Plant Physiology**, v. 59, p. 309-314, 1977.

HAMID, B.; ZAMAN, M.; FAROOQ, S.; FATIMA, S.; SAYYED, R. Z.; BABA, Z. A.; SHEIKH, T. A.; REDDY, M. S.; EL ENSHASY, H.; GAFUR, A.; SURIANI, N. L. Bacterial plant biostimulants: a sustainable way towards improving growth, productivity, and health of crops. **Sustainability**, v. 13, n. 5, p. 2856, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su13052856>.

JOHNSON, R.; VISHWAKARMA, K.; HOSSEN, M. S.; KUMAR, V.; SHACKIRA, A. M.; PUTHUR, J. T.; ABDI, G.; SARRAF, M.; HASANUZZAMAN, M. Potassium in plants: growth regulation, signaling, and environmental stress tolerance. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 172, p. 56–69, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2022.01.001>.

KIM, Y.-H.; KHAN, A. L.; WAQAS, M.; LEE, I.-J. Silicon regulates antioxidant activities of crop plants under abiotic-induced oxidative stress: a review. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, p. 510, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00510>.

LINNÉ, J. A.; CARDOSO, E. A. S.; FIGUEIREDO, V. M. A.; SILVERIO, J. M.; OLIVEIRA, T. C. C.; LIMA, V. T.; JESUS, M.V.; SCALON, S. D. P. Q. O silício no manejo de estresses bióticos e abióticos. In: SANTOS, C. C. **Manejo e Produção Sustentável**. Nova Xavantina: Editora Pantanal, 2022. p. 132-146.

LINNÉ, J. A.; JESUS, M. V.; LIMA, V. T.; REIS, L. C.; SANTOS, C. C.; SCALON, S. P. Q.; DRESCH, D. M. Do *Dipteryx alata* Vogel seedlings recover quality and photosynthetic responses in post-flooding? **Brazilian Journal of Biology**, v. 83, e246451, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1519-6984.246451>.

LINNÉ, J. A. Sombreamentos e doses de silicato de potássio e de macroalga *Ascophyllum nodosum* (L.) em mudas de *Myracrodruon urundeuva* Fr. Allemão sob déficit hídrico. 2024. 84 f. Tese (Doutorado em Agronomia – Produção Vegetal) – Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, MS, 2024.

LUCIANO, D. de O.; LIMA, C. A.; LOPES, M. B.; MOURA, D. M. de O.; FERREIRA, A. L. L.; MARTINS, A. L. L.; CHAGAS, L. F. B.; CHAGAS JUNIOR, A. F. *Bacillus* e *Trichoderma* como promotores de crescimento de *Eucalyptus urograndis*. **Research, Society and Development**, v. 12, n. 2, e11012239509, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.33448/rsd-v12i2.39509>

ORAEE, A.; TEHRANIFAR, A.; GHORBANI, Z.; SAYADAMIN, P. Potassium silicate enhances drought tolerance of *Bellis perennis* by improving antioxidant activity and osmotic regulators. **Advances in Horticultural Science**. v. 37, n. 4, e377389, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.36253/ahsc-14732>

PANDEY, G. K.; MAHIWAL, S. **Role of potassium in plants**. Switzerland: Springer, 2020. 81p.

PATEL, J. S.; SELVARAJ, V.; MORE, P.; BAHMANI, R.; BORZA, T.; PRITHIVIRAJ, B. A plant biostimulant from *Ascophyllum nodosum* potentiates plant growth promotion and stress protection activity of *Pseudomonas protegens* CHA0. **Plants**, v. 12, n. 6, p. 1208, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/plants12061208>.

PAULA, E. H. L. de; PAULINO, L. R.; SANTOS, C. C.; SILVERIO, J. M.; SCALON, S. de P. Q.; VIEIRA, M. do C. Potassium silicate and light availability affect photochemical efficiency and morphology of *Alibertia edulis*. **Scientia Agricola**, v. 81, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1678-992x-2023-0006>.

PIAO, S.; LIU, Q.; CHEN, A.; JANSSENS, I. A.; FU, Y.; DAI, J.; LIU, L.; LIAN, X.; SHEN, M.; ZHU, X. Plant phenology and global climate change: current progresses and challenges. **Global Change Biology**, v. 25, n. 6, p. 1922–1940, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/gcb.14619>.

QUEIROZ, D. L. de; CAMARGO, J. M. M.; DEDECEK, R. A.; OLIVEIRA, E. B. de; ZANOL, K. M. R.; MELIDO, R. C. N. Absorção e translocação de silício em mudas de *Eucalyptus camaldulensis*. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 2, p. 632–640, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/1980509832053>.

RAJPUT, V. D.; HARISH; SINGH, R. K.; VERMA, K. K.; SHARMA, L.; QUIROZ-FIGUEROA, F. R.; MEENA, M.; GOUR, V. S.; MINKINA, T.; SUSHKOVA, S.; MANDZHIEVA, S. Recent developments in enzymatic antioxidant defence mechanism in plants with special reference to abiotic stress. **Biology**, v. 10, n. 4, p. 267, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/biology10040267>.

REHMAN, R. S.; MUJAHID, A.; SYED, A. Z.; MUBASHAR, H.; ASAD, P.; MUHAMMAD, S. N.; MUHAMMAD, A.; MUHAMMAD, W. Absciscic Acid Mediated Abiotic Stress Tolerance in Plants. **Asian Journal of Research in Crop Science** 7 v. 1. p.1-17. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.9734/ajrcs/2022/v7i130128>.

ROCHA, G. A.; ROMANATTI, P. V.; OLIVEIRA, F. M.; CUNHA NETO, A. R. da; PEREIRA, F. J.; POLO, M. Ecophysiology of the tree species *Cedrela fissilis* submitted to flooding. **CERNE**, v. 24, n. 4, p. 323–333, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/01047760201824042525>.

RUZZI, M.; AROCA, R. Plant growth-promoting rhizobacteria act as biostimulants in horticulture. **Scientia Horticulturae**, v. 196, p. 124–134, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.08.042>.

SANTANIELLO, A.; SCARTAZZA, A.; GRESTA, F.; LORETI, E.; BIASONE, A.; DI TOMMASO, D.; PIAGGESI, A.; PERATA, P. *Ascophyllum nodosum* seaweed extract alleviates drought stress in *Arabidopsis*. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, p. 1362, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01362>.

SANTOS, C. C.; SCALON, S. P. Q.; FORESTI, A. C.; REIS, L. C.; DRESCH, D. M. The role of silicon in the mitigation of water stress in *Eugenia myrcianthes* seedlings. **Brazilian Journal of Biology**, v. 82, e260420, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1519-6984.260420>.

SANTOS, C. C.; OLIVEIRA, M. L. de; RIBEIRO, D. M.; SCALON, S. de P. Q.; LINNÉ, J. A.; SILVERIO, J. M.; FIGUEIREDO, V. M. de A.; SILVA, O. H. M. da. Organic residues and *Parachlorella* microalgae favor the growth and gas exchange of cedar. **Scientia Agricola**, v. 81, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1678-992x-2023-0077>.

SANTOS, C. C.; SILVA, A. A. S.; OLIVEIRA, C. H. de; SILVERIO, J. M.; DIAS, A. dos S.; LINNÉ, J. A.; SCALON, S. de P. Q.; ALOVISI, A. M. T. *Ascophyllum nodosum* seaweed extract in *Inga edulis* seedlings under drought. **Journal of Applied Phycology**, v. 35, n. 6, p. 3123–3135, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10811-023-03094-w>.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAUJO FILHO, J. C.; LIMA, H. N.; MARQUES, F. A.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília, DF: Embrapa, 2025.

SANTOS JUNIOR, C. F. dos; RECH, T. D.; NAVROSKI, M. C.; BOFF, P.; BOFF, M. I. C. Vegetative rescue of *Cedrela fissilis* by rooting of cuttings. **Ciência Rural**, v. 51, n. 8, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20200775>.

SANYAL, S. K.; RAJASHEKER, G.; KISHOR, P. B. K.; KUMAR, S. A.; KUMARI, P. H.; SARITHA, K. V.; RATHNAGIRI, P.; PANDEY, G. K. Role of protein phosphatases in signaling and abiotic stress responses. In: Protein phosphatases and stress management in plants. Cham: **Springer**, 2020. p. 203–232.

SARDANS, J.; PEÑUELAS, J. Potassium control of plant functions: ecological and agricultural implications. **Plants**, v. 10, n. 2, p. 419, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/plants10020419>.

SCALON, S. de P. Q.; SANTOS, C. C.; BADIANI, M.; TABALDI, L. A. Editorial: abiotic stress in plants. **Frontiers in Plant Science**, v. 15, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1386174>.

SHARMA, S.; BHATT, U.; SHARMA, J.; KALAJI, H. M.; MOJSKI, J.; SONI, V. Ultrastructure and alleviation mechanisms under waterlogging. **Photosynthetica**, v. 60, n. 3, p. 430–444, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.32615/ps.2022.033>.

SHARMA, S.; SHARMA, J.; SONI, V.; KALAJI, H. M.; ELSHEERY, N. I. Waterlogging tolerance in crop plants. **Journal of Water and Land Development**, p. 16–28, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.24425/jwld.2021.137092>.

SHUKLA, P. S.; MANTIN, E. G.; ADIL, M.; BAJPAI, S.; CRITCHLEY, A. T.; PRITHIVIRAJ, B. *Ascochyllum nodosum*-based biostimulants in agriculture. **Frontiers in Plant Science**, v. 10, p. 655, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00655>.

SHUKLA, V.; KUMAR, S.; TRIPATHI, Y. N.; UPADHYAY, R. S. *Bacillus subtilis*– and *Pseudomonas fluorescens*–mediated systemic resistance in tomato. **Frontiers in Fungal Biology**, v. 3, p. 851002, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/ffunb.2022.851002>.

SILVERIO, J. M.; SANTOS, J. K. V. dos; SILVA, M. S. da; SCALON, S. de P. Q.; SANTOS, C. C.; REIS, L. C.; LINNÉ, J. A. Does hydrogel help in mitigation and recovery under water stress? **Revista Caatinga**, v. 37, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1983-21252024v37i2000rc>.

SOUZA C. C.; OLIVEIRA F.A.; SILVA I. F.; AMORIM NETO M.S. (2000) Recuperação de métodos de determinação de água disponível e manejo da irrigação em terra roxa sob cultivo de algodoeiro herbáceo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 4, p. 338–342. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662000000300006>

VOESENEK, L. A. C. J.; SASIDHARAN, R.; VISSER, E. J. W.; BAILEY-SERRES, J. Flooding stress signaling through perturbations in oxygen, ethylene, nitric oxide and light. **The New Phytologist**, v. 209, n. 1, p. 39–43, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/nph.13775>.

YANG, Y.; HUANG, L.; YU, L.; ZHU, F.; CHANG, J.; LI, M.; WANG, S.; WANG, C.; ZHAN, H. Silicon accumulation and photosynthetic capacity of *Dendrocalamus brandisii*. **Plants**, v. 14, n. 17, p. 2624, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/plants14172624>.

ZANETTI, L. V.; MILANEZ, C. R. D.; GAMA, V. N.; AGUILAR, M. A. G.; SOUZA, C. A. S.; CAMPOSTRINI, E.; FERRAZ, T. M.; FIGUEIREDO, F. A. M. M. de A. Leaf application of silicon in young cacao plants under water deficit. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 3, p. 215–223, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2016000300003>.

ZHU, Y.-X.; GONG, H.-J.; YIN, J.-L. Role of silicon in mediating salt tolerance in plants. **Plants**, v. 8, n. 6, p. 147, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/plants8060147>.

CAPÍTULO II: EFEITO MITIGADOR DO SILICATO DE POTÁSSIO E *Bacillus subtilis* NO POTENCIAL DE RECUPERAÇÃO DE MUDAS DE *Cedrela fissilis* Vell SOB FLUTUAÇÃO HÍDRICA.

RESUMO

Cedrela fissilis Vell. é uma espécie florestal nativa amplamente utilizada em programas de restauração ecológica, porém frequentemente exposta, em condições naturais, a ambientes com elevada instabilidade hídrica. Apesar disso, ainda são escassos os estudos que avaliam suas respostas fisiológicas a estresses hídricos sequenciais, especialmente à flutuação hídrica, bem como o papel de estratégias mitigadoras nesse contexto. Assim, este trabalho teve como objetivo avaliar as respostas morfofisiológicas, bioquímicas e antioxidantes de mudas de *C. fissilis* submetidas à flutuação hídrica, caracterizada pela alternância entre déficit hídrico, reidratação e posterior alagamento, associada ou não à aplicação de silicato de potássio (K_2SiO_3) e *Bacillus subtilis*. Os fatores em estudo foram constituídos de dois regimes hídricos: Irrigação contínua (controle) e irrigação intermitente (caracterizada por déficit hídrico seguido de re-irrigação e posterior alagamento). Os tratamentos consistiram em plantas controle, plantas estressadas sem mitigador, plantas estressadas tratadas com K_2SiO_3 e plantas estressadas com aplicação de *Bacillus subtilis*. As mudas de *Cedrela fissilis* foram avaliadas em quatro épocas distintas: Fotossíntese zero e recuperação do déficit hídrico, e fotossíntese zero e recuperação do alagamento. Sendo avaliadas variáveis relacionadas às trocas gasosas, parâmetros da fluorescência da clorofila *a*, metabolismo antioxidante, crescimento e qualidade das mudas ao longo das diferentes fases do estresse. O déficit hídrico inicial promoveu acentuada redução da atividade fotossintética, fechamento estomático e limitação das trocas gasosas, evidenciando a sensibilidade das mudas à restrição hídrica. No entanto, durante a fase de recuperação e, principalmente, sob o estresse subsequente por alagamento, os tratamentos com silicato de potássio e *B. subtilis* proporcionaram respostas fisiológicas mais equilibradas, resultando em maior estabilidade do aparato fotossintético, melhor ajuste metabólico e menor custo associado à ativação do sistema antioxidante. O silicato de potássio contribuiu para a manutenção da integridade de membranas e para a eficiência fisiológica frente ao estresse sequencial, enquanto *B. subtilis* favoreceu o ajuste osmótico e a preservação da biomassa. De modo geral, os resultados demonstram que a flutuação hídrica compromete significativamente o desempenho fisiológico de mudas de *C. fissilis*, porém a aplicação de estratégias mitigadoras, como aplicação de bioestimulantes, *B. subtilis*, Si e K são eficientes em aumentar a tolerância ao estresse sequencial e potencializar a capacidade de recuperação, destacando a importância do manejo fisiológico visando à produção de mudas mais resilientes a ambientes com alta variabilidade hídrica.

PALAVRAS CHAVES: Plasticidade fenotípica, alagamento, déficit hídrico, K_2SiO_3

CHAPTER II: MITIGATING EFFECT OF POTASSIUM SILICATE AND BACTERIA ON THE RECOVERY POTENTIAL OF *Cedrela fissilis* Vell SEEDLINGS UNDER WATER FLUCTUATION.

ABSTRACT

Cedrela fissilis Vell. is a native forest species widely used in ecological restoration programs, but frequently exposed, under natural conditions, to environments with high water instability. Despite this, studies evaluating its physiological responses to sequential water stresses, especially water fluctuation, as well as the role of mitigation strategies in this context, are still scarce. Thus, this work aimed to evaluate the morphophysiological, biochemical, and antioxidant responses of *C. fissilis* seedlings subjected to water fluctuation, characterized by alternating water deficit, rehydration, and subsequent flooding, associated or not with the application of potassium silicate (K_2SiO_3) and *Bacillus subtilis*. The factors under study consisted of two water regimes: continuous irrigation (control) and intermittent irrigation (characterized by water deficit followed by re-irrigation and subsequent flooding). The treatments consisted of control plants, stressed plants without a mitigating agent, stressed plants treated with K_2SiO_3 , and stressed plants with *Bacillus subtilis* application. *Cedrela fissilis* seedlings were evaluated at four distinct times: zero photosynthesis and recovery from water deficit, and zero photosynthesis and recovery from flooding. Variables related to gas exchange, chlorophyll a fluorescence parameters, antioxidant metabolism, growth, and seedling quality were evaluated throughout the different stress phases. The initial water deficit promoted a marked reduction in photosynthetic activity, stomatal closure, and limitation of gas exchange, highlighting the sensitivity of the seedlings to water restriction. However, during the recovery phase and, especially, under subsequent flooding stress, treatments with potassium silicate and *B. subtilis* provided more balanced physiological responses, resulting in greater stability of the photosynthetic apparatus, better metabolic adjustment, and lower cost associated with the activation of the antioxidant system. Potassium silicate contributed to maintaining membrane integrity and physiological efficiency in the face of sequential stress, while *B. subtilis* favored osmotic adjustment and biomass preservation. Overall, the results demonstrate that water fluctuation significantly compromises the physiological performance of *C. fissilis* seedlings, but the application of mitigating strategies, such as the application of biostimulants, *B. subtilis*, Si, and K, are efficient in increasing tolerance to sequential stress and enhancing recovery capacity, highlighting the importance of physiological management aimed at producing seedlings more resilient to environments with high water variability.

KEYWORDS: Phenotypic plasticity; flooding; water deficit.

1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas globais têm intensificado a frequência de eventos extremos, como períodos prolongados de estiagem intercalados com chuvas intensas e alagamentos, configurando um cenário de flutuação hídrica ou estresses sequenciais cada vez mais comuns em ecossistemas naturais e sistemas de produção florestal (PIAO et al., 2019; SANTOS et al., 2022). Essa alternância entre déficit hídrico, reidratação e subsequente anoxia do solo impõe severas restrições ao crescimento e à sobrevivência de plantas, especialmente durante a fase inicial de estabelecimento, quando mudas apresentam limitada plasticidade fisiológica e estrutural (SHARMA et al., 2021; SANTOS et al., 2022). Nesse contexto, compreender os mecanismos de tolerância e recuperação das plantas frente a estresses hídricos sucessivos torna-se fundamental para o manejo e a restauração de espécies florestais nativas.

Cedrela fissilis Vell. (Meliaceae), conhecida popularmente como cedro-rosa, é uma espécie arbórea de elevado valor ecológico e econômico, amplamente utilizada em programas de restauração florestal e recomposição de matas ciliares (LOPEZ E FONTANA, 2024; KUINCHTNER et al., 2021). Entretanto, sua sensibilidade a condições edáficas adversas, especialmente à deficiência de oxigênio no solo e a oscilações abruptas na disponibilidade hídrica, pode comprometer o sucesso de seu estabelecimento em áreas sujeitas a regimes hidrológicos instáveis (PRADO et al., 2022). Estudos indicam que o estresse hídrico, seja por alagamento ou seca, provoca alterações profundas no metabolismo energético, no balanço hormonal, na integridade do sistema radicular, induz fechamento estomático, e com isso a eficiência fotossintética, causa desbalanço redox e danos às membranas celulares. (SHARMA et al., 2021; SANTOS et al., 2022; SCALON et al., 2024; SANTOS et al., 2025). A ocorrência sequencial desses estresses, caracterizando a flutuação hídrica, tende a potencializar os efeitos deletérios, reduzindo a capacidade de recuperação fisiológica das mudas (ROCHA et al., 2018; SANTOS et al., 2022).

Diante desse cenário, estratégias que visem aumentar a resiliência das plantas por meio da atenuação dos danos oxidativos, da manutenção da atividade fotossintética e da preservação da integridade estrutural dos tecidos tornam-se de grande interesse. O silício (Si), embora não seja considerado elemento essencial para a maioria das espécies, tem sido amplamente reconhecido como um importante atenuador de estresses abióticos, incluindo seca e alagamento (ZANETTI et al., 2016; YANG et al., 2025). Sua deposição nas paredes celulares pode aumentar a rigidez e a estabilidade estrutural, reduzir a perda de água por transpiração, modular a atividade antioxidante e contribuir para a manutenção do aparato fotossintético sob condições

adversas (ZHU et al., 2019; SANTOS et al., 2022). Além disso, o Si tem sido associado à regulação da expressão gênica relacionada ao metabolismo energético e à homeostase redox, fatores cruciais durante a transição entre estados de hipoxia e reoxigenação do sistema radicular (ZHU et al., 2019; FORESTI et al., 2024).

Outro elemento importante na mitigação dos sintomas dos estresses abióticos em plantas, é o potássio (K). O K é um nutriente essencial para o adequado funcionamento fisiológico das plantas, atuando de forma decisiva na regulação osmótica, na ativação de diversas enzimas e no equilíbrio iônico celular (JOHNSON et al., 2022). Sua presença adequada permite maior eficiência no controle estomático, favorecendo a manutenção das trocas gasosas e da fotossíntese, mesmo sob condições ambientais desfavoráveis. Em cenários como déficit hídrico, salinidade e temperaturas elevadas, o K contribui para a manutenção da turgescência celular, a integridade das membranas e a eficiência no transporte de fotoassimilados. Além disso, o potássio está associado à mitigação do estresse oxidativo, ao favorecer o funcionamento dos sistemas antioxidantes e reduzir a formação e os efeitos das espécies reativas de oxigênio, desempenhando papel fundamental na adaptação e na tolerância das plantas a ambientes limitantes (PANDEY E MAHIWAL, 2020; JOHNSON et al., 2022; PAULA et al., 2024).

Paralelamente, o uso de microrganismos promotores de crescimento de plantas (BPC), como *Bacillus subtilis*, tem emergido como uma abordagem sustentável para aumentar a tolerância das plantas a estresses ambientais. Essa bactéria é capaz de colonizar a rizosfera e os tecidos radiculares, produzindo fitormônios, solubilizando nutrientes, induzindo resistência sistêmica e estimulando a atividade de enzimas antioxidantes (RAASCH et al., 2013; LUCIANO et al., 2023). Em condições de estresse hídrico, *B. subtilis* pode favorecer o desenvolvimento radicular, melhorar a absorção de água e nutrientes e modular respostas fisiológicas associadas ao balanço hídrico e à integridade das membranas (RODRIGUES et al., 2025; CARNIETTO et al., 2025). Sob alagamento, sua atuação pode contribuir para a mitigação do estresse oxidativo decorrente da reoxigenação e para a manutenção do metabolismo energético por meio da indução de vias alternativas de respiração (CHEN et al. 2026).

A interação entre silicato de potássio e bactérias promotoras de crescimento apresenta potencial sinérgico, uma vez que o K_2SiO_3 pode melhorar o ambiente rizosférico e a arquitetura radicular, favorecendo a colonização microbiana, enquanto os microrganismos podem, por sua vez, aumentar a disponibilidade e a absorção de Si e K pelas plantas (SANTOS et al. 2022; TURAN et al., 2023). Essa associação pode resultar em respostas fisiológicas mais eficientes frente à flutuação hídrica, refletidas em maior estabilidade da fotossíntese, melhor controle

estomático, maior atividade antioxidante e maior capacidade de retomada do crescimento após os períodos de estresse (GARCIA-CAPARRÓS et al., 2020; PAULA et al., 2024).

Apesar dos avanços no entendimento isolado dos efeitos do silicato de potássio e de *Bacillus subtilis* sob seca ou alagamento, ainda são escassos os estudos que avaliam o potencial mitigador desses agentes sob condições de flutuação hídrica, especialmente em espécies nativas de interesse para restauração florestal, como *Cedrela fissilis*. A alternância entre seca, reidratação e posterior alagamento impõe desafios fisiológicos complexos, envolvendo ajustes rápidos no metabolismo energético, na condutância estomática, na dinâmica do sistema antioxidante e na integridade das membranas celulares, processos que podem ser diferencialmente modulados pela presença de Si, K e de microrganismos benéficos (ROCHA et al., 2018; SANTOS et. 2022).

Dessa forma, investigar o efeito mitigador do silicato de potássio e de *Bacillus subtilis* no potencial de recuperação de mudas de *Cedrela fissilis* submetidas à flutuação hídrica torna-se relevante do ponto de vista fisiológico. A compreensão dos mecanismos envolvidos poderá subsidiar estratégias de manejo e produção de mudas mais resilientes, contribuindo para o sucesso de projetos de restauração ecológica em ambientes sujeitos a variações extremas no regime hídrico. Além disso, os resultados poderão ampliar o conhecimento sobre as respostas fisiológicas e bioquímicas das plantas sob condições de estresses múltiplos, fortalecendo a base científica para o uso integrado de bioestimulantes e condicionadores minerais na silvicultura de espécies nativas.

2. MATERIAL E MÉTODOS

As mudas de *Cedrela fissilis* Vell. utilizadas no experimento foram produzidas no viveiro da Universidade Federal da Grande Dourados, a partir de sementes de frutos maduros coletados em área remanescente de Cerrado (Autorização de Acesso e de Remessa de Amostra de Componente do Patrimônio Genético nº 010220/2015-1 – CNPq/CGEN/MMA), no Estado de Mato Grosso do Sul. A semeadura foi realizada em tubetes de 50 x 190 mm preenchidos com Latossolo Vermelho Distroférico (LVd) de textura argilosa e areia na proporção de 1:1, no Viveiro de Plantas da UFGD coberto por telado preto de *nylon* com 70% de sombreamento. Posteriormente ao atingirem a altura de 10 cm, as mudas foram transplantadas para vasos com capacidade de 8kg, contendo LVd e areia grossa (3:1), sendo transplantadas 2 mudas por vaso.

Aos 30 dias após o transplante, os vasos foram levados para o ambiente com 30% de sombreamento onde permaneceram para aclimação. Durante todo tempo, houve controle de plantas daninhas de forma manual e regas diárias de acordo com a necessidade da espécie.

Os fatores em estudo foram constituídos de dois regimes hídricos (irrigação contínua - IC = controle, mantendo 70% da capacidade de retenção hídrica do substrato; e irrigação intermitente - II = suspensão da irrigação até que a taxa fotossintética apresente valor próximo a zero e posterior re-irrigação seguida de alagamento) associados aos tratamentos de K₂SiO₃ e bactéria via solo, além do controle sem nenhuma aplicação, totalizando quatro tratamentos sendo eles: 1) controle com irrigação contínua; 2) controle estressado submetido ao déficit hídrico e posterior alagamento; 3) plantas estressadas + 0,84 g de K₂SiO₃; 4) plantas estressadas + 10 mL L⁻¹ de bactéria *Bacillus subtilis*.

As doses de 0,84 g de K₂SiO₃ e 10 mL L⁻¹ de *Bacillus subtilis* foram estabelecidas com base em experimento anterior, no qual esses tratamentos apresentaram os melhores resultados quanto à taxa fotossintética das plantas.

Aos 65 DAT, a bactéria *Bacillus subtilis* foi aplicada via solo, de acordo com seu mecanismo de colonização rizosférica e promoção do crescimento radicular. A bactéria *Bacillus* foi obtida a partir do produto comercial SoluBio Raiz Performance®, e apresenta 1 x 10⁸ Unidades Formadoras de Colônias (UFC) por mL⁻¹. A inoculação consistiu na perfuração do solo a aproximadamente 10 cm de profundidade, utilizando um bastão de vidro, ao lado do caule de cada muda, seguida da inoculação do volume correspondente do produto biológico diretamente no orifício. Em seguida, o furo foi cuidadosamente fechado com o próprio substrato, garantindo o contato do inoculante com a zona radicular e evitando a exposição do microrganismo à luz solar ou à dessecação.

As aplicações de silicato de potássio foram realizadas aos 70 DAT, via pulverização foliar, utilizando-se um pulverizador costal, calibrado para proporcionar uma nebulização fina e uniforme sobre toda a superfície foliar, com as seguintes características: Pulverizador costal pressurizado com CO₂ à pressão constante de 41 PSI, acoplado a uma barra de aplicação de dois metros, composta de quatro pontas tipo leque (Jacto AXI – 110-02) regulado para vazão de 200 L ha⁻¹. O procedimento foi conduzido nas primeiras horas da manhã, sob condições ambientais favoráveis (temperatura amena e baixa velocidade do vento), a fim de maximizar a absorção foliar e reduzir perdas por evaporação ou deriva. A fonte de silicato de potássio adotada foi o fertilizante foliar que contém 11% de Si e 15% de K₂O. Para o preparo da calda, foram adicionados 2,0 mL de adjuvante LI 700 visando facilitar a aderência do K₂SiO₃ na superfície foliar.

QUADRO 1. Fases e dias após o transplântio (DAT) de mudas de *C. fissilis* submetidas a flutuação hídrica.

Fase	Dias após o transplântio (DAT)
Semeadura	-
Transplântio	0 DAT
Inoculação das bactérias	60 DAT
Aplicação do K ₂ SiO ₃ / início do déficit hídrico (dh)	70 DAT
Fim do dh (F0) / início da recuperação do dh (REC dh)	78 DAT
Fim da REC dh/ início do alagamento (alag)	96 DAT
Fim do alagamento (F0 alag) e início da REC alag	126 DAT
Fim da REC alag	200 DAT

QUADRO 2: Atributos químicos do solo após aplicação dos tratamentos em diferentes épocas de avaliação após colheita das mudas de *C. fissilis*, em Dourados -MS. (1 = controle; 2 = estresse; 3 = estresse + K₂SiO₃; 4 = estresse + *B. subtilis*).

Trat./Época		pH	P	Ca	K	Mg	Al	H+Al	SB	V
		CaCl ₂	mg dm ³	-----mmol _c dm ⁻³ -----						%
1	F0 dh	4,56	15,36	4,69	0,27	1,55	0,12	4,83	6,53	57,5
	REC dh	4,66	12,21	4,68	0,28	1,57	0,12	3,95	6,55	62,4
	Alag.	4,77	9,68	4,68	0,18	1,41	0,12	3,23	6,27	66,0
2	F0 dh	4,57	15,15	4,30	0,28	1,51	0,12	4,53	6,10	54,4
	REC dh	4,70	8,87	4,51	0,24	1,56	0,12	3,74	6,32	62,8
	Alag.	4,72	9,20	4,46	0,26	1,50	0,12	3,51	6,24	64,0
3	F0 dh	4,65	15,46	3,65	0,24	1,28	0,12	4,07	5,18	56,0
	REC dh	4,71	8,97	4,69	0,28	1,60	0,12	3,66	6,58	64,2
	Alag.	4,74	9,58	3,75	0,18	1,17	0,12	3,23	5,12	61,3
4	F0 dh	4,61	12,62	4,10	0,26	1,52	0,12	4,03	5,90	59,4
	REC dh	4,74	8,97	4,32	0,24	1,51	0,12	3,40	6,09	64,2
	Alag.	4,76	8,97	4,63	0,23	1,53	0,12	3,37	6,40	65,5

As mudas de *Cedrela fissilis* foram avaliadas em quatro épocas distintas, correspondentes aos momentos críticos dos dois tipos de estresse impostos (déficit hídrico e alagamento), com início aos 70 DAT, conforme segue:

- F0 dh (fotossíntese zero – déficit hídrico): Aos 78 DAT, as mudas de pelo menos um dos tratamentos submetidos à suspensão da irrigação apresentaram taxa fotossintética próxima de zero, caracterizando a condição máxima de déficit hídrico.
- REC dh (recuperação – déficit hídrico): período subsequente à re-irrigação das mudas, aos 96 DAT, quando estas apresentaram recuperação da taxa fotossintética para valores estatisticamente semelhantes aos das plantas do controle irrigado, indicando reversão dos efeitos do estresse.
- F0 alag (fotossíntese zero – alagamento): Aos 126 DAT, as mudas de pelo menos um dos tratamentos submetidos ao alagamento atingiram fotossíntese próxima de zero, momento em que foram retiradas da piscina de alagamento e deixadas escoar o excesso de água, caracterizando o ponto crítico de anoxia radicular.

- REC alag (recuperação – alagamento): Aos 200 DAT, período correspondente à fase de recuperação fisiológica pós-alagamento, observou-se o restabelecimento da taxa fotossintética em valores semelhantes aos do tratamento controle irrigado. Contudo, a maioria das mudas submetidas ao alagamento apresentou intensa senescência foliar, evoluindo para morte, o que inviabilizou a realização de análise estatística nessa fase. Com isso, os dados apresentados nesse experimento contemplam apenas as três fases abaixo (Fig. 1).

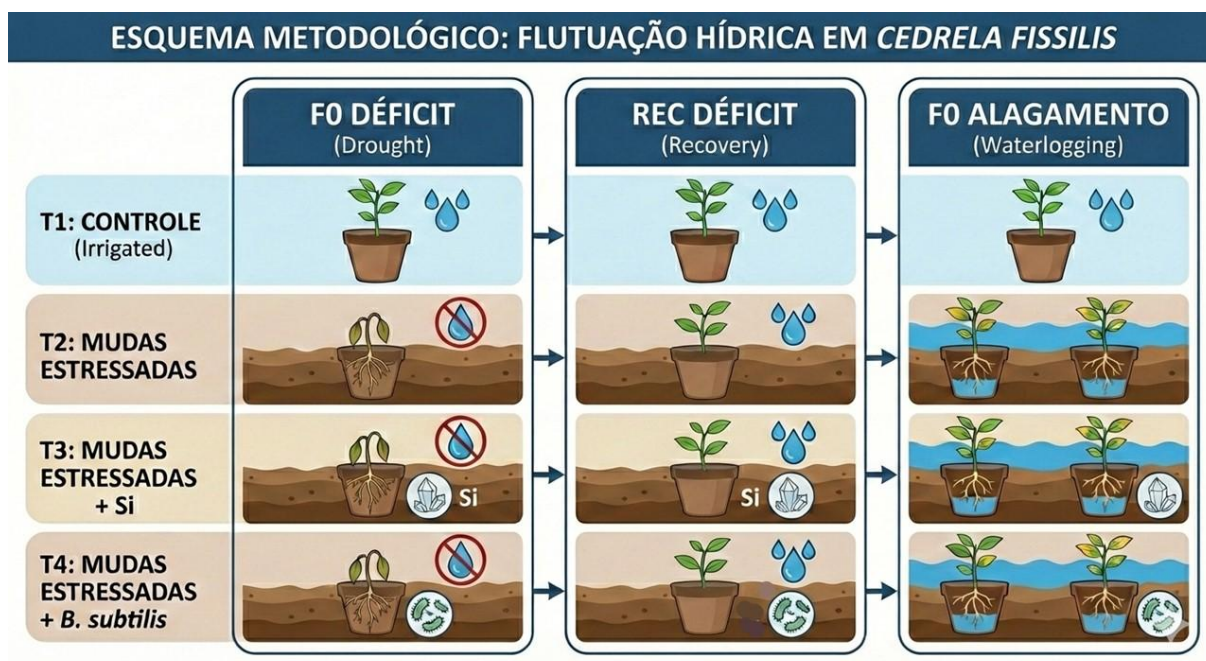


FIGURA 1. Esquema metodológico de mudas de *C. fissilis* mantidas em déficit hídrico (F0 déficit), recuperação do déficit hídrico (REC) e alagamento (F0 alagamento). Os tratamentos testados foram: T1- controle com irrigação normal; T2 – estressado sem mitigador; T3 – estressado com aplicação de K_2SiO_3 ; T4 – estressado com aplicação de *Bacillus subtilis*.

O experimento foi arranjado no delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial sendo 4 tratamentos x 3 épocas de avaliação (F0 dh; REC dh; F0 alag.) com quatro repetições.

2. 1 Avaliações

Foram avaliadas as seguintes características:

A) Trocas gasosas: Realizadas com um analisador de gás infravermelho (IRGA) modelo LCIPro - SD ADC BioScientific Ltd., obtendo os seguintes parâmetros: taxa fotossintética líquida - A ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), condutância estomática - g_s ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), taxa de transpiração - E ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), concentração interna de CO_2 - C_i ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$) e eficiência de carboxilação da Rubisco - A/C_i ($\mu\text{mol } \mu\text{mol mol}^{-1}$). As avaliações foram realizadas no período da manhã, entre 8 e 11h, selecionando folhas do terço médio das mudas, completamente expandidas e previamente marcadas, de modo que todas as medições fossem sempre realizadas nas mesmas folhas. As leituras ocorreram com valor de radiação fotossinteticamente ativa de $223 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ sob 30% de sombreamento.

B) Parâmetros de fluorescência da clorofila a : avaliados com um fluorômetro portátil modelo OS-30p (Opti-Sciences Chlorophyll Fluorometer, Hudson, USA). Os parâmetros obtidos foram: Fluorescência inicial - F_0 , eficiência quântica potencial do FSII - F_v/F_m , rendimento quântico efetivo de conversão de energia fotoquímica no FSII - F_v/F_0 e produção quântica basal dos processos não fotoquímicos no FSII - F_0/F_m . A determinação da fluorescência foi realizada entre 8 e 11h da manhã, nas mesmas folhas utilizadas para as avaliações das trocas gasosas, as quais foram submetidas a um período de 30 minutos de adaptação ao escuro com o auxílio de cliques adaptadores, para que todos os centros de reação nessa região foliar alcançassem a condição de “aberto”, ou seja, oxidação completa do sistema fotossintético de transporte de elétrons.

C) Atividade de enzimas antioxidantes: Amostras das folhas e raízes foram congeladas em Nitrogênio líquido. De cada amostra foi pesado 1 g para ser macerado em 6 mL de solução contendo 0,3 g de polivinilpirrolidona (PVP) diluído em 100 mL de tampão fosfato de potássio (0,2 M), realizando-se a centrifugação a 4000 rpm por 20 minutos. O sobrenadante foi utilizado como extrato enzimático para determinação da atividade da superóxido dismutase (GIANNOPOLITIS E RIES, 1977) e peroxidase (BROETTO et al., 2014), utilizando espectrofotômetro para leitura das amostras. Para a quantificação de proteínas totais, adotou-se a metodologia de Bradford (1976), em que amostras frescas do material foram utilizadas na preparação do extrato. As leituras das absorbâncias foram realizadas em triplicatas no comprimento de onda de 595 nm, utilizando espectrofotômetro (Metash Visible Spectrophotometer - model V5000). Para prolina, utilizou-se a metodologia modificada de Bates et al. (1973), em que os materiais foram secos em estufa à 60°C por 72 horas e usando tolueno como referência, as leituras de absorção foram realizadas em triplicatas no comprimento de onda de 520 nm com espectrofotômetro.

D) Crescimento e qualidade de mudas (IQD): Determinou-se a área foliar das mudas utilizando um integrador de área foliar ((LI-COR, 3100 C – Area Meter, Nebraska – USA), e os dados biomassa fresca e seca com a utilização de uma balança de precisão e posteriormente os dados foram utilizados para determinação da massa seca total (MST), relação altura/diâmetro (RAD) e massa seca parte aérea/raiz (RPAR), em que foi calculado o índice de qualidade de Dickson segundo a equação
$$IQD = \left[\frac{MST}{RAD + RPAR} \right]$$
 (Dickson et al., 1960).

Para cada época, o experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado (DIC), com 4 tratamentos e quatro repetições e cada unidade experimental constituída por duas mudas por vaso. Os dados obtidos das avaliações destrutivas e das não-destrutivas foram submetidos à análise de variância e quando significativos, as médias foram comparadas pelo teste de Scott-Knott, à 5% de probabilidade. O programa estatístico utilizado foi o SISVAR 5.6 (FERREIRA, 2010).

3. RESULTADOS

Todas as características avaliadas nas mudas apresentaram efeito significativo dos tratamentos, exceto eficiência do uso de água (A/E), eficiência intrínseca de água (A/G_s), F_v/F_0 e F_0/F_m , em fotossíntese zero (F_0) em déficit hídrico. Em REC, não apresentaram efeitos significativo nos tratamentos a taxa de assimilação de CO_2 (A), condutância estomática (G_s), área foliar (AF), F_v/F_m , F_v/F_0 , F_0/F_m e proteína da parte aérea. Também não houve efeito significativo dos tratamentos em eficiência do uso de água (A/E) e proteína da parte aérea na fase de alagamento.

As avaliações da taxa de assimilação líquida de CO_2 (A) indicaram que, em F_0 (déficit hídrico), as mudas do tratamento 1 (T1), sob irrigação contínua, apresentaram a maior média, diferindo significativamente dos demais tratamentos. Nos grupos submetidos ao estresse hídrico (T2, T3 e T4), verificou-se queda acentuada da fotossíntese, com valores próximos a zero, sem diferença significativa entre a presença ou ausência de mitigadores nessa fase (Fig. 2A). Na condição de alagamento (F_0 – alagamento), as mudas do tratamento controle (T1) mantiveram a maior taxa fotossintética, diferindo significativamente dos demais. As mudas do tratamento 2 apresentaram desempenho inferior ao controle, porém superior aos tratamentos com mitigadores, enquanto sob os tratamentos 3 (K_2SiO_3) e 4 (*B. subtilis*) exibiram as menores eficiências fotossintéticas, diferindo tanto do controle quanto do tratamento apenas estressado (Fig. 2C).

Em relação à condutância estomática (g_s), em F_0 (déficit hídrico), as mudas do tratamento 1 (T1) novamente apresentaram os maiores valores, com diferença significativa em relação aos demais. A suspensão da irrigação nos tratamentos T2, T3 e T4 resultou em forte redução da abertura estomática, com valores inferiores ao controle e significativamente semelhantes entre si (Fig. 2D). Durante a fase de alagamento (F_0 – alagamento), as mudas controle, mantidas sob condições adequadas de umidade, apresentaram as maiores taxas de g_s , diferindo significativamente das demais. Em contraste, as mudas submetidas à hipóxia (T2, T3 e T4) exibiram fechamento estomático quase completo, com g_s próxima de zero (Fig. 2F).

Para a taxa de transpiração (E), em F_0 (déficit hídrico), as mudas do tratamento 1 apresentaram as maiores médias, diferindo significativamente dos tratamentos sob restrição hídrica. Nestes últimos (T2, T3 e T4), observou-se redução expressiva da perda de água, com valores inferiores ao controle e semelhantes entre si (Fig. 2G). Na fase de recuperação (REC), observou-se padrão distinto das demais variáveis, com os tratamentos 3 (K_2SiO_3) e 4 (*B. subtilis*) apresentando as maiores taxas transpiratórias, diferindo significativamente das mudas

sob T1 e T2, que exibiram valores menores (Fig. 2H). Na fase de alagamento (F0 – alagamento), as mudas do controle mantiveram a maior taxa de transpiração, diferindo significativamente das demais. As mudas do T2 apresentaram valores intermediários, enquanto sob T3 e T4 registraram as menores médias, diferindo significativamente tanto do controle quanto do tratamento apenas estressado (Fig. 2I).

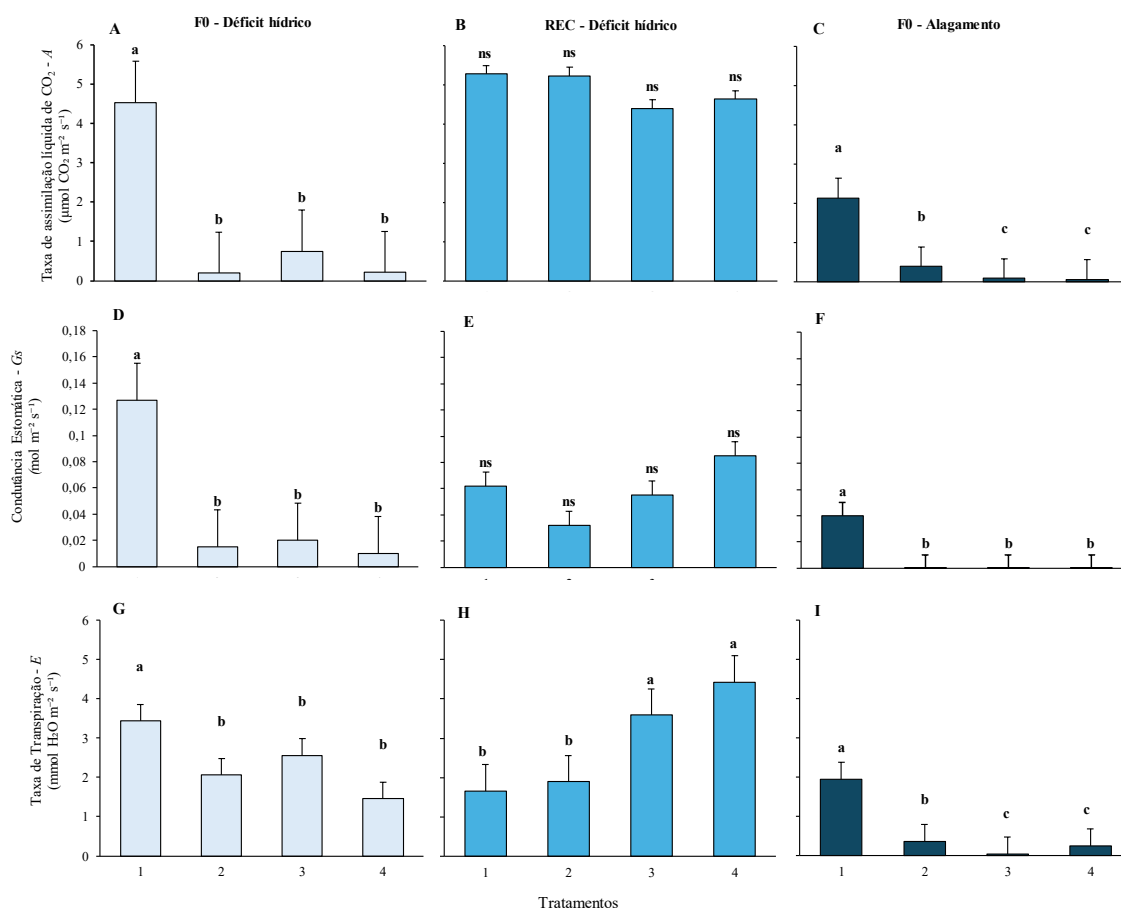


Figura 2. Taxa de assimilação líquida de CO₂ (A - C); Condutância estomática – Gs (D - F); Taxa de transpiração – E (G - I). As avaliações correspondem às fases de: F0 – Déficit hídrico; REC – Recuperação; e F0 – Alagamento em mudas de *C. fissilis* cultivadas em diferentes tratamentos (1- controle com irrigação normal; 2 – estressado sem mitigador; 3 – estressado com aplicação de K₂SiO₃; 4 – estressado com aplicação de *Bacillus subtilis*). Letras minúsculas iguais não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p \geq 0,05$); ns: não-significativo.

Quanto à eficiência do uso da água (A/E), os resultados mostraram que, na fase de recuperação (REC), as mudas do controle apresentaram a maior média, diferindo significativamente dos outros tratamentos. As mudas que passaram pelo histórico de estresse

(T2, T3 e T4), independentemente do uso de mitigadores, exibiram valores inferiores de eficiência e não diferiram significativamente entre si (Fig. 3B).

As análises de eficiência intrínseca do uso da água (A/gs) evidenciaram que, na fase de recuperação (REC), as mudas do controle (T1) e estressadas (T2) apresentaram as maiores médias, não diferindo significativamente entre si. Em contrapartida, sob os tratamentos 3 (K_2SiO_3) e 4 (*B. subtilis*) as mudas exibiram valores significativamente inferiores (Fig. 3E). Na fase de alagamento (F0 - alagamento), as mudas T2 apresentaram a maior média absoluta, diferindo significativamente das demais. As mudas sob os tratamentos com mitigadores (3 e 4) exibiram valores intermediários, não diferindo entre si, mas sendo superiores ao controle. As mudas controle, por sua vez, registraram a menor eficiência intrínseca, diferindo estatisticamente de todos os grupos submetidos ao alagamento (Fig. 3F).

Para área foliar (AF), as mudas do F0 (déficit hídrico) nos tratamentos 1, 2 e 3 apresentaram as maiores médias, não diferindo significativamente entre si. Em contrapartida, as mudas T4, com aplicação de *B. subtilis*, apresentaram redução significativa da área foliar em comparação às demais (Fig. 3G). Na fase de alagamento (F0 - alagamento) as mudas T1 (controle) e T4 (estresse + *B. subtilis*) exibiram as maiores médias, diferindo significativamente dos tratamentos 2 (estresse) e 3 (estresse + K_2SiO_3), que apresentaram reduções expressivas na área foliar sob condição de hipóxia (Fig. 3I).

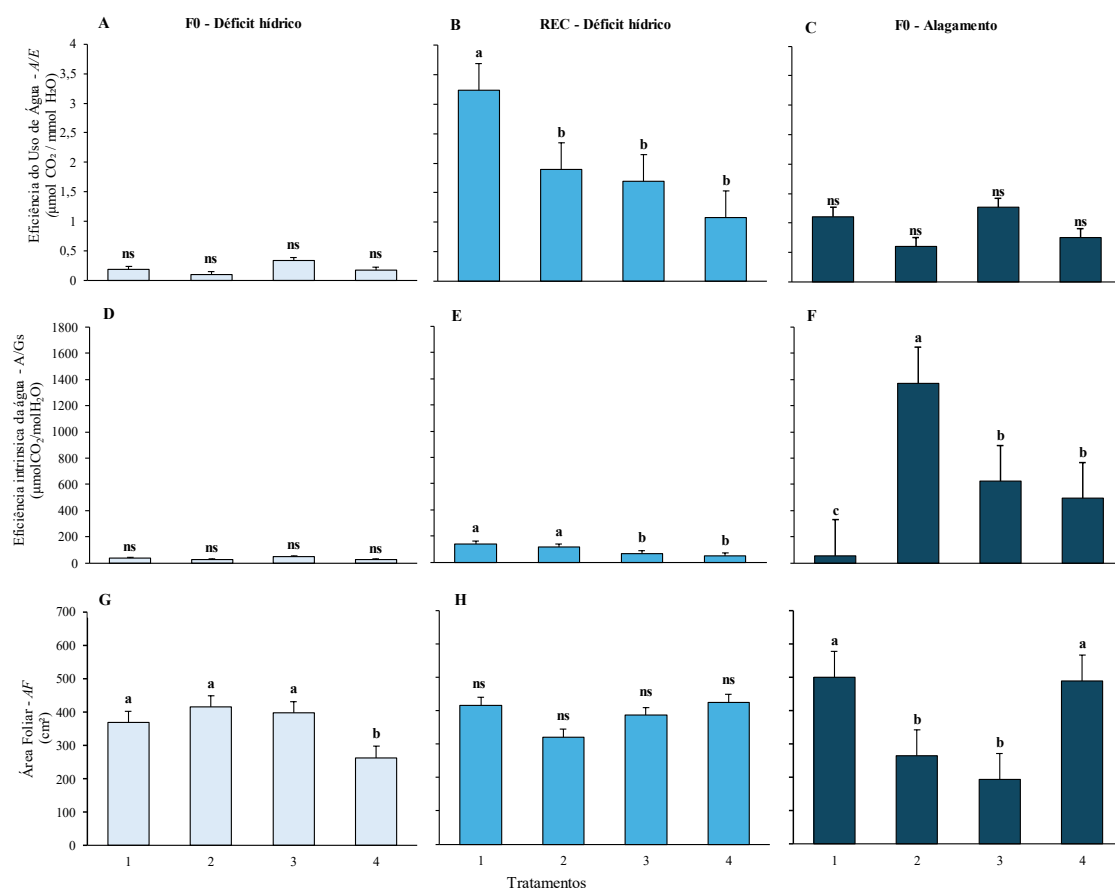


FIGURA 3. Eficiência do uso de água – A/E (A - C); Eficiência intrínseca de água – A/G_s (D - F); Área foliar - AF (G - I). As avaliações correspondem às fases de: F0 – Déficit hídrico; REC – Recuperação; e F0 – Alagamento em mudas de *C. fissilis* cultivadas em diferentes tratamentos (1- controle com irrigação normal; 2 – estressado sem mitigador; 3 – estressado com aplicação de K_2SiO_3 ; 4 – estressado com aplicação de *Bacillus subtilis*). Letras minúsculas iguais não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p \geq 0,05$); ns: não-significativo.

Em F0 (déficit hídrico), a fluorescência da clorofila *a* (F_v/F_m) das mudas dos tratamentos T1, T2 e T4 apresentaram os maiores valores, sem diferença estatística entre elas. Em contraste, sob T3, os valores foram significativamente inferiores aos demais (Fig. 4A). Na fase de alagamento (F0 – alagamento), observou-se um padrão distinto, em que sob T1 e T3 as mudas exibiram as maiores médias, diferindo significativamente dos outros tratamentos. Por outro lado, sob os tratamentos 2 (apenas estressado) e 4 (*B. subtilis*) foram observadas reduções acentuadas na razão F_v/F_m , diferindo estatisticamente do grupo anterior sob condição de hipóxia (Fig. 4C).

Para a razão F_v/F_0 , na fase de alagamento, as mudas T1 e T3 mantiveram os maiores valores, sem diferença significativa entre si. Em contrapartida, sob os tratamentos 2 (apenas estressado) e 4 (*B. subtilis*), observam-se reduções expressivas nessa característica, diferindo significativamente do primeiro grupo (Fig. 4F). Comportamento inverso foi observado para a

razão F_0/F_m durante o alagamento, em que as mudas dos tratamentos 2 e 4 apresentaram as maiores médias, sem diferença entre si, enquanto sob os tratamentos 1 (controle) e 3 (K_2SiO_3) registraram os menores valores, diferindo estatisticamente do grupo anterior (Fig. 4I).

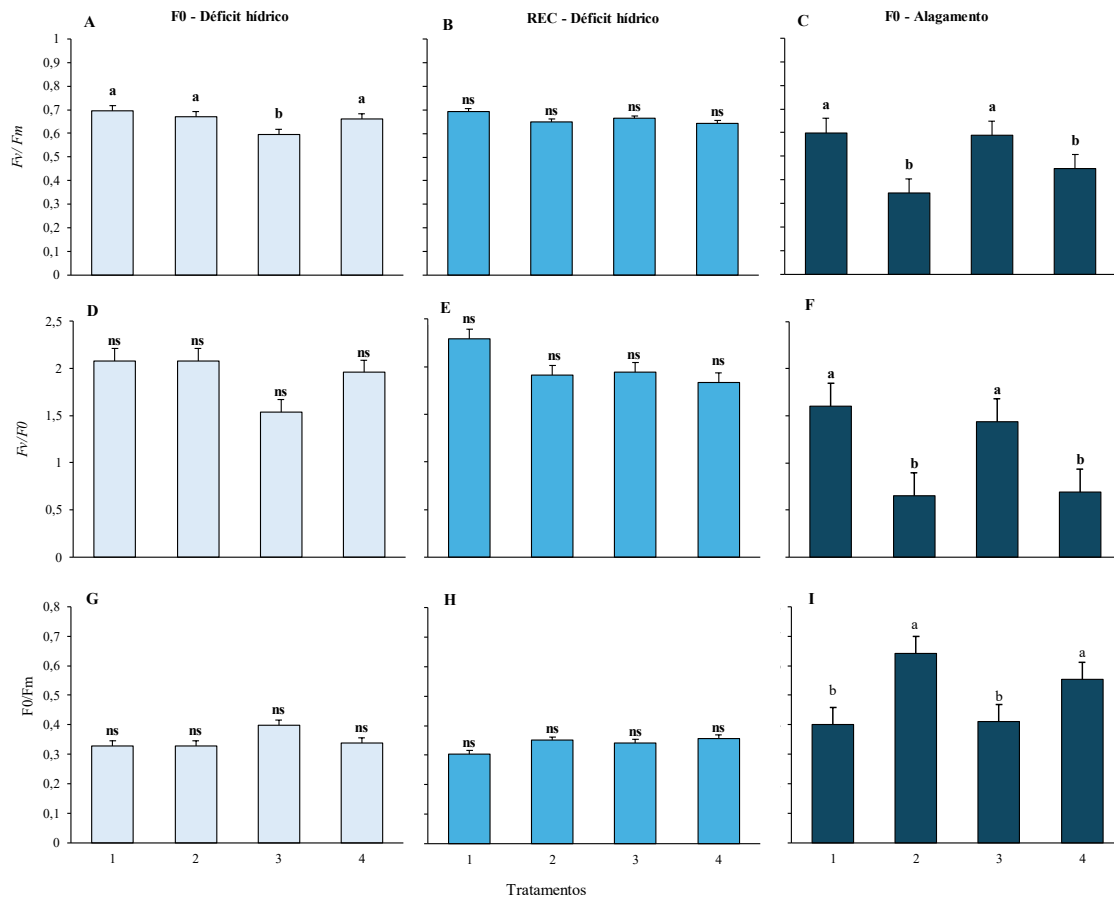


FIGURA 4. Eficiência máxima do PSII – F_v/F_m (A - C); Eficiência potencial do OS II – F_v/F_0 (D - F); Fluorescência basal – F_0/F_m (G - I). As avaliações correspondem às fases de: F0 – Déficit hídrico; REC – Recuperação; e F0 – Alagamento em mudas de *C. fissilis* cultivadas em diferentes tratamentos (1- controle com irrigação normal; 2 – estressado sem mitigador; 3 – estressado com aplicação de K_2SiO_3 ; 4 – estressado com aplicação de *Bacillus subtilis*). Letras minúsculas iguais não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p \geq 0,05$); ns: não-significativo.

As análises do teor de proteínas na parte aérea indicaram que, em F0 (déficit hídrico), as mudas do tratamento 4 (*B. subtilis*) apresentaram a maior média, diferindo significativamente dos demais tratamentos. Os tratamentos 1 (controle), 2 (estressado) e 3 (silicato de potássio) apresentaram valores inferiores e significativamente semelhantes entre si (Fig. 5A).

A atividade da superóxido dismutase (SOD) na parte aérea, em F0 (déficit hídrico), foi mais elevada nas mudas submetidas ao estresse (T2, T3 e T4), as quais não diferiram significativamente entre si. Em contraste, sob o tratamento 1 (controle) registrou-se a menor

atividade enzimática, diferindo significativamente dos demais (Fig. 5D). Na fase de recuperação (REC), destacou-se o tratamento 3 (silicato de potássio), sob o qual as mudas mantiveram a maior atividade de SOD, diferindo significativamente dos outros tratamentos. Sob T1, T2 e T4 as mudas apresentaram redução da atividade enzimática, com valores estatisticamente semelhantes entre si (Fig. 5E). Durante a fase de alagamento (F0 – alagamento), as mudas controle voltaram a apresentar a maior atividade de SOD na parte aérea, diferindo significativamente das demais, enquanto aquelas com histórico de estresse prévio (T2, T3 e T4) exibiram atividades reduzidas e significativamente semelhantes (Fig. 5F).

Quanto à atividade da SOD nas raízes, em F0 (déficit hídrico), as mudas do tratamento 2 (apenas estressado) apresentaram a maior média, diferindo significativamente das demais. Os tratamentos com mitigadores, 3 (silicato de potássio) e 4 (*B. subtilis*) proporcionaram valores intermediários e significativamente semelhantes entre si, porém superiores ao controle (T1), que proporcionou a menor atividade nessa fase (Fig. 5G). Na fase de recuperação (REC), as mudas previamente submetidas ao estresse (T2, T3 e T4) mantiveram as maiores atividades de SOD radicular, sem diferenças significativas entre si (Fig. 5H). Sob alagamento (F0 – alagamento), as mudas do tratamento controle novamente apresentaram a maior atividade enzimática, diferindo significativamente das demais, enquanto sob os tratamentos estressados exibiram redução da atividade e valores significativamente semelhantes entre si (Fig. 5I).

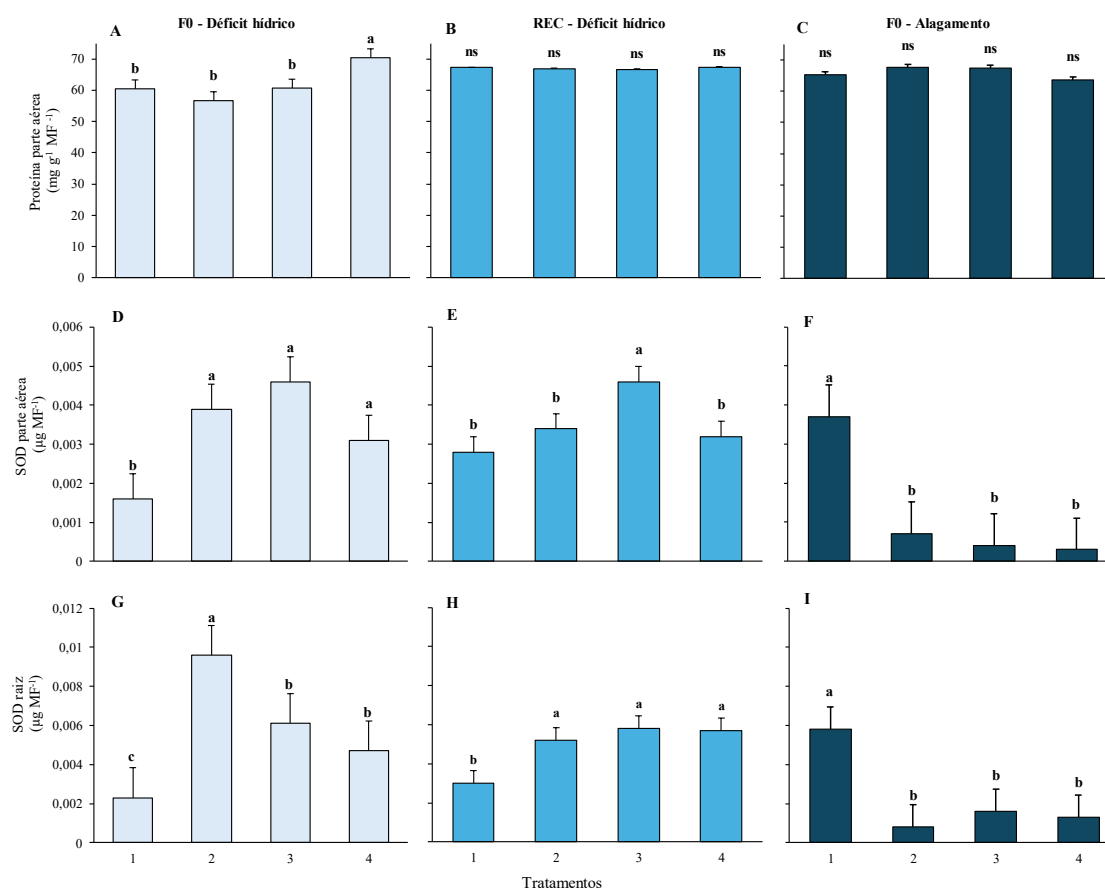


FIGURA 5. Proteínas totais da parte aérea (A - C); Superóxido dismutase da parte aérea – SOD pa (D - F); SOD da raiz (G - I). As avaliações correspondem às fases de: F0 – Déficit hídrico; REC – Recuperação; e F0 – Alagamento em mudas de *C. fissilis* cultivadas em diferentes tratamentos (1- controle com irrigação normal; 2 – estressado sem mitigador; 3 – estressado com aplicação de K_2SiO_3 ; 4 – estressado com aplicação de *Bacillus subtilis*). Letras minúsculas iguais não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p \geq 0,05$); ns: não-significativo.

O teor de prolina livre na parte aérea, em F0 (Déficit hídrico) foi maior nas mudas do tratamento 4 (com *B. subtilis*), diferindo significativamente de todos os outros tratamentos. Sob o tratamento 3 (com silicato de potássio), os valores foram intermediários, superiores ao controle e ao tratamento apenas estressado. Sob os tratamentos 1 (controle) e 2 (estressado) foram observados os menores teores, não diferindo significativamente entre si (Fig. 6A). Na fase de recuperação (REC), as mudas T2 (apenas estressado) apresentaram um aumento significativo no teor de prolina, registrando a maior média e diferindo das demais. Sob os tratamentos 1 (controle), 3 (silicato de potássio) e 4 (*B. subtilis*), os teores foram inferiores e semelhantes entre si, indicando que, nos tratamentos com mitigadores, os níveis de prolina retornaram aos valores basais do controle após a reidratação (Fig. 6B). Já na fase de alagamento (F0 - alagamento), as mudas dos tratamentos com mitigadores, 3 (silicato de potássio) e 4 (*B.*

subtilis), apresentaram as maiores médias, não diferindo entre si. Por outro lado, as mudas dos tratamentos 1 (controle) e 2 (apenas estressado) registraram valores significativamente inferiores, indicando que a aplicação de K_2SiO_3 e *B. subtilis* induziu um acúmulo diferencial deste aminoácido sob condições de hipóxia (Fig. 6C).

Quanto ao teor de prolina livre na parte aérea, os resultados mostram que, em F0 (déficit hídrico), sob o tratamento 4 (com *B. subtilis*) proporcionou a maior média, diferindo significativamente dos demais. Sob os tratamentos 1 (controle), 2 (estressado) e 3 (com K_2SiO_3) observa-se valores inferiores e semelhantes entre si (Figura 6D). Na fase de recuperação (REC), sob T1, T2 e T4 as mudas, apresentaram as maiores médias, não diferindo entre si (Fig. 6E). Na fase de alagamento (F0 - alagamento), sob o tratamento 1 (controle) observa-se a maior média, diferindo significativamente de todos os outros grupos. Os tratamentos com mitigadores, 3 (K_2SiO_3) e 4 (*B. subtilis*) proporcionaram valores intermediários, superiores ao do tratamento 2 (apenas estressado), no qual as mudas apresentaram a menor concentração de prolina nesta fase, diferindo significativamente dos outros tratamentos (Fig. 6F).

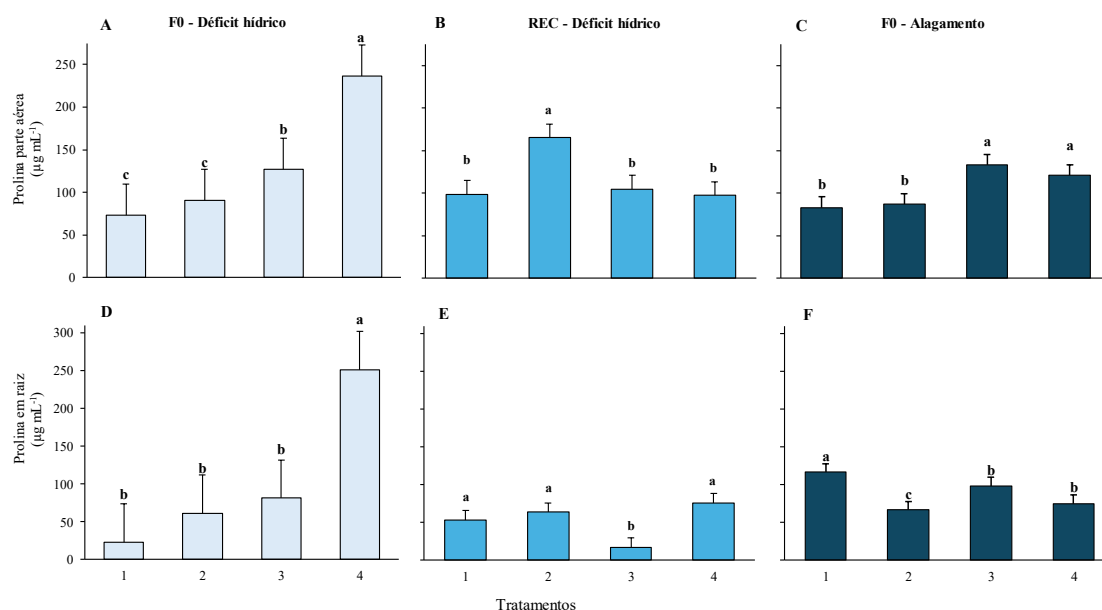


FIGURA 6. Prolina da parte aérea (A - C); Prolina em raiz (D - F). As avaliações correspondem às fases de: F0 – Déficit hídrico; REC – Recuperação; e F0 – Alagamento em mudas de *C. fissilis* cultivadas em diferentes tratamentos (1- controle com irrigação normal; 2 – estressado sem mitigador; 3 – estressado com aplicação de K_2SiO_3 ; 4 – estressado com aplicação de *Bacillus subtilis*). Letras minúsculas iguais não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p \geq 0,05$); ns: não-significativo.

4. DISCUSSÃO

A submissão de mudas de *Cedrela fissilis* ao regime de flutuação hídrica revelou que a plasticidade fenotípica da espécie é dependente do histórico de estresse e da interação com agentes mitigadores, o mesmo encontrado por Silvério et al., (2024), em *C. fissilis* ao avaliar a interação entre a luz e água. A resposta das plantas ao estresse sequencial (déficit hídrico seguido de alagamento) não seguiu um padrão linear de degradação, mas exibiu estratégias de aclimação distintas mediadas pelo Silicato de potássio (K_2SiO_3) e por *Bacillus subtilis* (BPC) (ZHU et al., 2019; TURAN et al., 2023).

Inicialmente, em relação à morfologia foliar, a redução da área foliar observada sob déficit hídrico (F0), especialmente no tratamento inoculado com *B. subtilis*, corrobora estratégias clássicas de evitação à seca descritas na literatura (SILVÉRIO et al., 2024; RODRIGUES et al., 2025). A diminuição da superfície transpiratória é um mecanismo conservativo para manutenção do potencial hídrico (TAIZ et al., 2017). Contudo, o comportamento singular deste tratamento sob alagamento subsequente, mantendo a área foliar em níveis comparáveis ao controle, sugere uma modulação hormonal induzida pela rizobactéria (ADJEI et al., 2025; CARNIETTO et al., 2025). Estudos prévios indicam que BPCPs (Bactérias Promotoras de Crescimento de Plantas) podem reduzir os níveis de etileno na planta hospedeira através da atividade da enzima ACC-desaminase, retardando a senescência e a abscisão foliar típicas de condições de hipóxia (GOWTHAM et al., 2020). Em contraste, a abscisão severa nos tratamentos com silicato de potássio e estresse isolado reflete a resposta padrão de espécies sensíveis ao alagamento, visando mitigar a demanda respiratória de tecidos aéreos frente a um sistema radicular anóxico (SHARMA et al., 2021).

A maior sobrevivência das mudas sob alagamento pode estar relacionada, além de outros fatores não avaliados, à formação de lenticelas hipertrofiadas que foram observadas nas mudas dos tratamentos que passaram pelo alagamento. Segundo Junglos et al. (2018), essas estruturas constituem uma resposta adaptativa induzida pelo etileno em condições de hipóxia/anóxia. As lenticelas hipertrofiadas favorecem as trocas gasosas e a difusão de oxigênio da parte aérea para o sistema radicular, além de auxiliarem na eliminação de metabólitos potencialmente tóxicos e do excesso de etileno acumulado sob baixa disponibilidade de oxigênio. Dessa forma, a presença dessas estruturas em mudas de *C. fissilis* pode ter contribuído para a manutenção da respiração aeróbica e para maior tolerância ao alagamento (LI et al., 2015).

No que tange às trocas gasosas, a redução generalizada da assimilação líquida de CO₂ (*A*) e da condutância estomática (*gs*) durante o déficit hídrico evidencia o fechamento estomático como primeira linha de defesa em *C. fissilis*, limitando a perda de água, mas restringindo a carboxilação (SANTOS et al., 2021; SILVÉRIO et al., 2025). Na fase de recuperação (REC), o restabelecimento dos parâmetros fotossintéticos aos níveis do controle demonstra a resiliência da espécie na fase juvenil. Entretanto, o aumento das taxas de transpiração (*E*) nos tratamentos com mitigadores, associado a uma menor eficiência intrínseca do uso da água (*A/gs*), indica uma estratégia de recuperação baseada no alto fluxo hidráulico (FLEXAS et al., 2007; LINNÉ et al., 2022). A literatura sugere que o Silício pode aumentar a condutividade hidráulica das raízes e a expressão de aquaporinas (CHEN et al., 2018; AVILA et al., 2019), enquanto *B. subtilis* promove o desenvolvimento de pelos radiculares, facilitando a absorção de água (RUZZI E AROCA, 2015). Sob alagamento, o fechamento estomático severo nos grupos estressados, mesmo naqueles que mantiveram folhas (T4), confirma que a sinalização química radicular (provavelmente via ácido abscísico) prevalece sobre a demanda atmosférica, induzindo o fechamento estomático para prevenir a dessecação fisiológica decorrente da baixa condutividade hidráulica da raiz hipóxica (REHMAN et al., 2022).

A análise da fluorescência da clorofila a revelou a eficácia distinta dos mitigadores na proteção do aparato fotoquímico. Durante o alagamento, a manutenção da razão *Fv/Fm* e *Fv/F0* no tratamento com silicato de potássio, em níveis semelhantes ao controle, sugere a preservação da integridade estrutural dos tilacóides e a funcionalidade dos centros de reação do Fotossistema II.

Outros trabalhos relatam o papel do Si na proteção do aparato fotossintético. Em ingá (*Inga vera* Willd), sob restrição hídrica, a dose de 0,84 g de Si amenizou os danos ao aparato fotossintético (SANTOS et al., 2023), enquanto em *Talisia esculenta* Radl (Pitomba), Figueiredo et al. (2023) encontraram que o Si nas doses 0,5 e 1,0 g L⁻¹ auxilia nas trocas gasosas, fluorescência inicial e qualidade das mudas. Além disso, o Silício é conhecido por sua deposição na parede celular e membranas, conferindo estabilidade mecânica e reduzindo a fluidez de membrana causada pela peroxidação lipídica sob estresse (DABRAVOLSKI et al., 2024).

Em contrapartida, a queda acentuada destes parâmetros e a elevação da fluorescência inicial (*F0*) e da relação *F0/Fm* nos tratamentos inoculados e apenas estressados indicam danos fotoinibitórios e dissipação térmica excessiva, demonstrando que a proteção morfológica conferida pela bactéria não se estendeu à proteção fotoquímica sob anoxia. Kalaji et al. (2018) afirma que o aumento de *F0* está associado aos danos no centro de reação do fotossistema II

(PSII) e que o aumento do F0/Fm indica perda estrutural da eficiência fotoquímica. Assim, quando esses parâmetros se elevam simultaneamente, a dissipação da energia ocorre predominantemente como calor, caracterizando fotoinibição.

No âmbito bioquímico, o perfil de proteínas e prolina elucidou os mecanismos subjacentes à tolerância observada, evidenciando a ativação de respostas osmoprotetoras e metabólicas associadas à manutenção da integridade celular. O acúmulo significativo de proteínas solúveis e prolina nas mudas do tratamento com *B. subtilis* durante a suspensão hídrica, evidencia um ajuste osmótico ativo. A prolina atua como soluto compatível e estabilizador de macromoléculas, fundamental para a sobrevivência celular sob baixo potencial hídrico (GOWTHAM et al., 2020). Este resultado corrobora com o encontrado por Lubyanova et al. (2023), que ao analisar a aplicação de *B. subtilis* em sementes de trigo, as plantas apresentaram maior acúmulo de prolina em comparação com plantas não tratadas sob estresse. Este "*priming*" bioquímico explica a capacidade do tratamento T4 em suportar a seca, embora tal reserva não tenha sido suficiente para impedir os danos oxidativos no alagamento subsequente. A exaustão metabólica do tratamento estressado sem mitigação (T2) ficou evidente pela incapacidade de acumular prolina nas fases críticas, resultando na maior suscetibilidade aos estresses.

Por fim, a persistência da alta atividade da SOD nas raízes de todos os tratamentos estressados durante a recuperação indica que o sistema antioxidante permaneceu ativado, consumindo energia metabólica mesmo após a reidratação. Assim podemos indicar que a *C. fissilis* apresentou sensibilidade aos estresses aplicados, mas o metabolismo antioxidante contribui para recuperação dessas mudas.

No evento de alagamento, a incapacidade destes mesmos tratamentos em elevar a atividade da SOD na parte aérea, ao contrário do controle que respondeu vigorosamente, sugere uma limitação na plasticidade bioquímica decorrente do desgaste prévio causado pela combinação dos estresses. Contudo, o tratamento com silicato de potássio, mesmo com menor atividade enzimática no alagamento, manteve a integridade funcional, corroborando a hipótese de que o Si e K atuam como uma barreira física e estrutural que reduzem a formação de Espécies Reativas de Oxigênio (EROs), diminuindo a dependência da planta por mecanismos de varredura enzimática (KAUR et al., 2021; RAJPUT et al., 2021; LINNÉ et al., 2022; JOHNSON et al., 2022).

Diante do exposto, os resultados demonstram que o histórico de restrição hídrica altera a resposta de *Cedrela fissilis* ao alagamento. Enquanto o *Bacillus subtilis* confere resistência via ajuste osmótico e manutenção da arquitetura foliar (tolerância morfológica), o silicato de

potássio promove a estabilidade de membranas e eficiência fotoquímica (tolerância fisiológica). A combinação destas estratégias aponta para caminhos complementares na aclimação de espécies florestais a regimes hídricos flutuantes. Assim, a utilização de mitigadores reconfigura a memória da planta ao estresse, induzindo mecanismos distintos de tolerância cruzada.

5. CONCLUSÃO

Os resultados indicam que a alternância entre déficit hídrico e alagamento provoca um custo metabólico acumulado em *Cedrela fissilis*, no qual o estresse hídrico prévio limita a capacidade antioxidante durante o alagamento, culminando num colapso fisiológico nas mudas sem tratamento. A inoculação com *Bacillus subtilis* promove uma resistência predominantemente morfológica que garante a manutenção da arquitetura foliar e evita a abscisão sob hipóxia. Em contraste, o silicato de potássio contribui para a estabilidade estrutural e fotoquímica das plantas, protegendo membranas e centros de reação e mantendo a funcionalidade das estruturas fotossinteticamente ativas, mesmo quando a resposta antioxidante enzimática é limitada tanto sob déficit hídrico quanto durante o alagamento. Portanto, ambas as estratégias mitigam efetivamente os danos do estresse sequencial, oferecendo proteção complementar via manutenção da biomassa ou estabilidade celular.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADJEL, M. O.; YU, R.; CAO, X.; FAN, B. The mechanisms of *Bacillus subtilis* as a plant-beneficial rhizobacterium in plant-microbe interactions. **Microorganisms**, v. 13, n. 12, p. 2823, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/microorganisms13122823>.

AVILA, R. G.; MAGALHÃES, P. C.; DA SILVA, E. M.; GOMES JÚNIOR, C. C.; DE PAULA LANA, U. G.; DE ALVARENGA, A. A.; DE SOUZA, T. C. Silicon supplementation improves tolerance to water deficiency in sorghum plants by increasing root system growth and improving photosynthesis. **Silicon**, v. 12, n. 11, p. 2545–2554, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12633-019-00349-5>.

BATES, L. S.; WALDREN, R. P.; TEARE, I. D. Rapid determination of free proline for water-stress studies. **Plant and Soil**, v. 39, p. 205-207, 1973.

BRADFORD, M. M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. **Analytical Biochemistry**, v. 72, p. 248-254, 1976.

BROETTO, F. **Métodos de trabalho em bioquímica vegetal e tecnologia de enzimas**. Botucatu: IBB Cultura, 2014. 92p.

CARNIETTO, M. R. A.; LUIZ SANTOS, H.; FERREIRA, L. de S.; SILVA, G. F. da; ALMEIDA SILVA, M. de. Soil texture affects the efficiency of *Bacillus subtilis* and *Bacillus licheniformis* in the physiological and biochemical modulation of sugarcane tolerance to water deficit. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 225, p. 109997, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2025.109997>.

CHEN, D.; WANG, S.; YIN, L.; DENG, X. How does silicon mediate plant water uptake and loss under water deficiency? **Frontiers in Plant Science**, v. 9, art. 281, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00281>.

CHEN, Y. H.; LIU, J. Y.; HWANG, S. G.; LIN, Y. H.; HUANG, J. W.; HUANG, T. P. Biofilms of *Bacillus subtilis* as biostimulants for plant resilience to drought and flooding. **Scientific Reports**, v.16, p. 6113 2026. <https://doi.org/10.1038/s41598-026-36767-w>

DABRAVOLSKI, S. A.; ISAYENKOV, S. V. The physiological and molecular mechanisms of silicon action in salt stress amelioration. **Plants**, v. 13, n. 4, art. 525, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants13040525>.

DICKSON, A.; LEAF, A.; HOSNER, J.F. Quality appraisal of white spruce and white pine seedling stock in nurseries. **Forestry Chronicle**, v. 36, p. 10-13, 1960.

FERREIRA, D. F. **Programa de análises estatísticas (Statistical Analysis Software) e planejamento de Experimentos – SISVAR 5.3**. Lavras: UFLA, 2010.

FIGUEIREDO, V. M. de A.; SCALON, S. de P. Q.; SANTOS, C. C.; LINNÉ, J. A.; SILVERIO, J. M.; CERQUEIRA, W. M.; ALMEIDA, J. L. da C. S. de. Do silicon and salicylic acid

attenuate water deficit damage in *Talisia esculenta* Radlk seedlings? **Plants**, v. 12, n. 18, p. 3183, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/plants12183183>.

FLEXAS, J.; RIBAS-CARBÓ, M.; DIAZ-ESPEJO, A.; GALMÉS, J.; MEDRANO, H. Mesophyll conductance to CO₂: current knowledge and future prospects. **Plant, Cell and Environment**, v. 31, p. 602–621, 2007. Disponível em: 10.1111/j.1365-3040.2007.01757.x

FORESTI, A. C.; PAULA QUINTÃO SCALON, S. de; SANTOS, C. C.; REIS, L. C.; LINNÉ, J. A. Does silicon in *Eugenia myrcianthes* seedlings under water stress contribute to tolerance and recovery? **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 24, n. 2, p. 2208–2220, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s42729-024-01664-6>.

GIANNGIOPOLITIS, I.; REIS, S. K. Superoxide dismutases: I. Occurrence in higher plants. **Plant Physiology**, v. 59, p. 309–314, 1977.

GOWTHAM, H.G.; BRIJESH, S. S. A.; MURALI, M.B.; SHILPA, N.A.; MELVIN, P.; MOHAMMED, A.; AMRUTHESH, K.N.B.; NIRANJANA, S.R.A. Induction of drought tolerance in tomato upon the application of ACC deaminase producing plant growth promoting rhizobacterium *Bacillus subtilis* Rhizo SF 48. **Microbiological Research**, v. 234, art. 126422, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126422>.

JOHNSON, R.; VISHWAKARMA, K.; HOSSEN, M. S.; KUMAR, V.; SHACKIRA, A. M.; PUTHUR, J. T.; ABDI, G.; SARRAF, M.; HASANUZZAMAN, M. Potassium in plants: growth regulation, signaling, and environmental stress tolerance. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 172, p. 56–69, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2022.01.001>.

JUNGLOS, F. S.; JUNGLOS, M. S.; DRESCH, D. M.; BENTO, L. F.; SANTIAGO, E. F.; MUSSURY, R. M.; SCALON, S. P. Q. Morphophysiological responses of *Ormosia arborea* (Vell.) Harms (Fabaceae) seedlings under flooding and post-flooding conditions. **Australian Journal of Botany**, v. 66, n. 7, p. 499, 2018. <http://dx.doi.org/10.1071/BT17206>

KALAJI, H. M.; BAĞA, W.; GEDIGA, K.; GOLTSEV, V.; SAMBORSKA, I. A.; CETNER, M. D.; DIMITROVA, S.; PISZCZ, U.; BIELECKI, K.; KARMOWSKA, K.; DANKOV, K.; KOMPAŁA-BAĞA, A. Chlorophyll fluorescence as a tool for nutrient status identification in rapeseed plants. **Photosynthesis Research**, v. 136, n. 3, p. 329–343, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11120-017-0467-7>.

KAUR, H.; KOHLI, S. K.; KHANNA, K.; BHARDWAJ, R. Scrutinizing the impact of water deficit in plants: transcriptional regulation, signaling, photosynthetic efficacy, and management. **Physiologia Plantarum**, v. 172, n. 2, p. 935–962, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1111/ppl.13389>.

KUINCHTNER, C.; SILVA WERTONGE DE OLIVEIRA, G.; MIRANDA DE AGUILAR, M. V.; BERNARDY, D.; BERGER, M.; TABALDI, L. A. Can species *Cedrela fissilis* Vell. be used in sites contaminated with toxic aluminum and cadmium metals? **iForest: Biogeosciences and Forestry**, v. 14, n. 6, p. 508–516, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3832/ifor3890-014>.

LI, M.; LOPEZ, R.; VENTURAS, M.; PITA, P.; GORDALIZA, G. G.; GIL, L.; RODRIGUEZ-CALCERRADA, J. Greater resistance to flooding of seedlings of *Ulmus laevis* than *Ulmus*

minor is related to the maintenance of a more positive carbon balance. **Trees**, v. 29, p. 835–848, 2015. <https://doi.org/10.1007/s00468-015-1163-x>

LINNÉ, J. A.; CARDOSO, E. A. S.; FIGUEIREDO, V. M. A.; SILVERIO, J. M.; OLIVEIRA, T. C. C.; LIMA, V. T.; JESUS, M.V.; SCALON, S. D. P. Q. O silício no manejo de estresses bióticos e abióticos. In: SANTOS, C. C. **Manejo e Produção Sustentável**. Nova Xavantina: Editora Pantanal, 2022. p. 132-146.

LÓPEZ, L.; FONTANA, C. A cross-biome analysis of *Cedrela fissilis* Vell.: growth, age, and diameter class transitions. **Trees, Forests and People**, v. 18, art. 100666, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2024.100666>.

LUBYANOVA, A. R.; ALLAGULOVA, C. R.; LASTOCHKINA, O. 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, art. 2684, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants12142684>.

LUCIANO, D. de O.; LIMA, C. A.; LOPES, M. B.; MOURA, D. M. de O.; FERREIRA, A. L. L.; MARTINS, A. L. L.; CHAGAS, L. F. B.; CHAGAS JUNIOR, A. F. *Bacillus* e *Trichoderma* como promotores de crescimento de *Eucalyptus urograndis*. **Research, Society and Development**, v. 12, n. 2, e11012239509, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.33448/rsd-v12i2.39509>

PANDEY, G. K.; MAHIWAL, S. **Role of potassium in plants**. Switzerland: Springer, 2020. 81p.

PAULA, E. H. L. de; PAULINO, L. R.; SANTOS, C. C.; SILVERIO, J. M.; SCALON, S. de P. Q.; VIEIRA, M. do C. Potassium silicate and light availability affect photochemical efficiency and morphology of *Alibertia edulis*. **Scientia Agricola**, v. 81, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1678-992x-2023-0006>

PIAO, S.; LIU, Q.; CHEN, A.; JANSSENS, I. A.; FU, Y.; DAI, J.; LIU, L.; LIAN, X.; SHEN, M.; ZHU, X. Plant phenology and global climate change: current progresses and challenges. **Global Change Biology**, v. 25, n. 6, p. 1922–1940, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/gcb.14619>.

PRADO, M. C. do N.; GIULIANI, G. K. F.; GHIOTTO, T. C.; DO CARMO, J. B.; GUERREIRO, J. C.; PRADO, E. P.; POGETTO, M. H. F. do A. D.; MASSON, M. V.; TAVARES, W. de S.; WILCKEN, C. F.; ZANUNCIO, J. C.; FERREIRA-FILHO, P. J. Detection and estimation of *Mastigimas anjosi* (Hemiptera: Calophyidae) populations on *Cedrela fissilis* trees. **Royal Society Open Science**, v. 9, n. 3, art. 211340, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1098/rsos.211340>.

RAASCH, L. D.; BONALDO, S. M.; DE OLIVEIRA, A. A. F. *Bacillus subtilis*: enraizamento e crescimento de miniestacas de eucalipto em Sinop, norte de Mato Grosso. **Bioscience Journal**, v. 29, p. 1446–1457, 2013. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/15179>.

RAJPUT, V. D.; HARISH; SINGH, R. K.; VERMA, K. K.; SHARMA, L.; QUIROZ-FIGUEROA, F. R.; MEENA, M.; GOUR, V. S.; MINKINA, T.; SUSHKOVA, S.; MANDZHIEVA, S. Recent developments in enzymatic antioxidant defence mechanism in

plants with special reference to abiotic stress. **Biology**, v. 10, n. 4, art. 267, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/biology10040267>.

REHMAN, R. S.; MUJAHID, A.; SYED, A. Z.; MUBASHAR, H.; ASAD, P.; MUHAMMAD, S. N.; MUHAMMAD, A.; MUHAMMAD, W. Absciscic Acid Mediated Abiotic Stress Tolerance in Plants. **Asian Journal of Research in Crop Science** 7 v. 1. p.1-17. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.9734/ajrcs/2022/v7i130128>.

ROCHA, G. A.; ROMANATTI, P. V.; OLIVEIRA, F. M.; CUNHA NETO, A. R. da; PEREIRA, F. J.; POLO, M. Ecophysiology of the tree species *Cedrela fissilis* submitted to flooding. **CERNE**, v. 24, n. 4, p. 323–333, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/01047760201824042525>.

RODRIGUES, M. C. S. F.; BRITO BRITO, M. L.; DA SILVA, V. D. P. P.; MENDONÇA, D. P.; RIBEIRO, M. J. G.; DA SILVA, G. B.; DE CASTRO, G. L. S. Combined application of *Bacillus subtilis* and seaweed extracts in açai palm seedlings subjected to water deficit and recovery. **Journal of Applied Phycology**, v. 37, n. 4, p. 2933–2945, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10811-025-03555-4>.

RUZZI, M.; AROCA, R. Plant growth-promoting rhizobacteria act as biostimulants in horticulture. **Scientia Horticulturae**, v. 196, p. 124–134, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.08.042>.

SANTOS JUNIOR, C. F. dos; RECH, T. D.; NAVROSKI, M. C.; BOFF, P.; BOFF, M. I. C. Vegetative rescue of *Cedrela fissilis* by rooting of cuttings. **Ciência Rural**, v. 51, n. 8, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20200775>.

SANTOS, C. C.; BELTRAMIN, F. A.; SILVA, W. C.; SILVERIO, J. M.; SCALON, S. P. Q.; DE SOUZA, F. H.; HOLSB AQUE, V. G.; JANSE, R. A. L. Hydrogel alleviates the stressful effect of drought in *Schinus terebinthifolia* and helps with post-stress recovery. **Revista Brasileira de Biologia (Brazilian Journal of Biology)**, v. 85, e289691, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1590/1519-6984.289691>.

SANTOS, C. C.; SCALON, S. P. Q.; FORESTI, A. C.; REIS, L. C.; DRESCH, D. M. The role of silicon in the mitigation of water stress in *Eugenia myrcianthes* seedlings. **Brazilian Journal of Biology**, v. 82, e260420, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1519-6984.260420>.

SANTOS, C. C.; SILVA, A. A. S.; OLIVEIRA, C. H. de; SILVERIO, J. M.; DIAS, A. dos S.; LINNÉ, J. A.; SCALON, S. de P. Q.; ALOVISI, A. M. T. *Ascophyllum nodosum* seaweed extract in *Inga edulis* seedlings under drought. **Journal of Applied Phycology**, v. 35, n. 6, p. 3123–3135, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10811-023-03094-w>.

SCALON, S. de P. Q.; SANTOS, C. C.; BADIANI, M.; TABALDI, L. A. Editorial: abiotic stress in plants. **Frontiers in Plant Science**, v. 15, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1386174>

SHARMA, S.; SHARMA, J.; SONI, V.; KALAJI, H. M.; ELSHEERY, N. I. Waterlogging tolerance in crop plants. **Journal of Water and Land Development**, p. 16–28, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.24425/jwld.2021.137092>

SILVERIO, J. M.; SCALON, S. de P. Q.; SANTOS, C. C.; DOS SANTOS DIAS, A.; PEREIRA, D.; JANSE, R. A. L.; SOUZA, J. P. de C.; MACEDO, L. G. R. Gas exchange and antioxidant metabolism of *Cedrela fissilis* Vell. seedlings under varying water and light availability. **Flora**, v. 330, art. 152793, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.flora.2025.152793>.

SILVERIO, J. M.; SCALON, S. de P. Q.; SANTOS, C. C.; LINNÉ, J. A.; DIAS, A. D. S.; BERNARDES, R. da S.; DANTAS, T. Water-light interaction and its effect on the morphophysiology of *Cedrela fissilis* Vell. seedlings. **Plants**, v. 13, n. 18, art. 2654, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants13182654>.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6.ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 888 p.

TURAN, M.; EKINCI, M.; ARGIN, S.; BRINZA, M.; YILDIRIM, E. Drought stress amelioration in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) seedlings by biostimulant as regenerative agent. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, art. 1211210, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1211210>.

YANG, Y.; HUANG, L.; YU, L.; ZHU, F.; CHANG, J.; LI, M.; WANG, S.; WANG, C.; ZHAN, H. Silicon accumulation and photosynthetic capacity of *Dendrocalamus brandisii*. **Plants**, v. 14, n. 17, p. 2624, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/plants14172624>

ZANETTI, L. V.; MILANEZ, C. R. D.; GAMA, V. N.; AGUILAR, M. A. G.; SOUZA, C. A. S.; CAMPOSTRINI, E.; FERRAZ, T. M.; FIGUEIREDO, F. A. M. M. de A. Leaf application of silicon in young cacao plants under water deficit. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 3, p. 215–223, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2016000300003>

ZHU, Y.-X.; GONG, H.-J.; YIN, J.-L. Role of silicon in mediating salt tolerance in plants. **Plants**, v. 8, n. 6, p. 147, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/plants8060147>

CONSIDERAÇÕES GERAIS

De modo geral, os resultados obtidos ao longo dos dois experimentos demonstram que *Cedrela fissilis* Vell. apresenta elevada sensibilidade às alterações na disponibilidade hídrica, tanto em condições de excesso quanto de restrição de água, refletindo limitações significativas nos metabolismos fotossintético, morfofisiológico e de crescimento quando submetida a estresses hídricos isolados ou sequenciais. Entretanto, os estudos evidenciam que a espécie possui considerável plasticidade fisiológica, a qual pode ser potencializada por estratégias de manejo adequadas ainda na fase de viveiro. O alagamento e a flutuação hídrica a partir do oitavo dia comprometeram a atividade fotossintética, as trocas gasosas e o crescimento das mudas não tratadas, indicando elevada dependência de ajustes fisiológicos eficientes para a manutenção do desempenho metabólico sob condições de hipoxia ou déficit hídrico.

A aplicação de silicato de potássio, extrato de alga marinha (*Ascophyllum nodosum*) e da bactéria promotora de crescimento *Bacillus subtilis*, de forma isolada ou combinada, mostrou-se eficaz na mitigação dos efeitos negativos dos estresses hídricos, promovendo maior estabilidade do aparato fotossintético, melhor ajuste osmótico, preservação da integridade de membranas e respostas antioxidantes mais equilibradas, reduzindo o custo metabólico associado ao estresse. Enquanto o silicato de potássio contribuiu principalmente para a manutenção estrutural e eficiência fisiológica, o extrato de alga marinha atuou na ativação de respostas metabólicas relacionadas à tolerância ao estresse, e *B. subtilis* favoreceu ajustes morfológicos e osmóticos que resultaram em maior preservação da biomassa e qualidade das mudas.

Assim, conclui-se que a adoção dessas estratégias mitigadoras é fundamental para aumentar a tolerância de mudas de *C. fissilis* a ambientes com elevada instabilidade hídrica, seja por alagamento, déficit hídrico ou flutuação hídrica, potencializando sua capacidade de recuperação e sobrevivência pós-plantio. Esses resultados reforçam a importância do manejo fisiológico integrado na fase de viveiro como ferramenta estratégica para a produção de mudas mais resilientes, contribuindo diretamente para o sucesso de programas de restauração ecológica e reflorestamento em cenários de mudanças climáticas.

7. ANEXOS



Experimento do Cap. I – Sementes de Cedro para sementeira.



Experimento do Cap. I - Visão geral das mudas do T1 ao T11 após alagamento.



Experimento do Cap. I – Extrato de algas, aplicação dos tratamentos e avaliação com o fluorímetro em plantas.



Experimento do Cap. I – Visão geral das mudas na piscina e avaliação com o IRGA.



Experimento do Cap. II – Mudanças com sintomas de déficit hídrico e mudas com lenticelas após fase de alagamento.



Experimento do Cap. II – Mudanças do T1 (controle) e mudas do T3 após alagamento.



Experimento do Cap. II – Visão geral das mudas após a fase de alagamento.