

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

**USO DO SILÍCIO E ASCOPHYLLUM NODOSUM NA CANA ENERGIA SOB
ESTRESSE COMBINADO POR LEIFSONIA XYLI E DÉFICIT HÍDRICO.**

HENRICO AUGUSTO BRAGANTE ZERBATO

JABOTICABAL – SP
2º Semestre/2026

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL

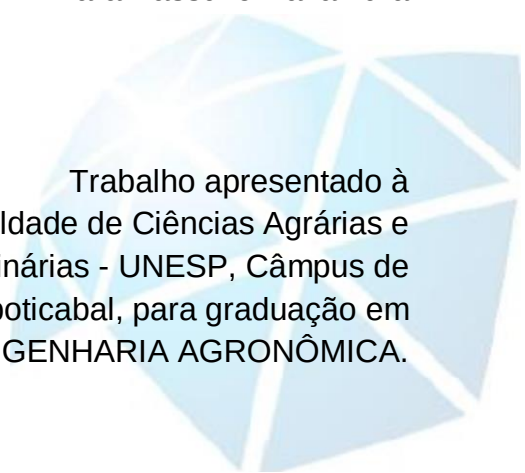
**USO DO SILÍCIO E ASCOPHYLLUM NODOSUM NA CANA ENERGIA SOB
ESTRESSE COMBINADO POR LEIFSONIA XYLI E DÉFICIT HÍDRICO.**

HENRICO AUGUSTO BRAGANTE ZERBATO

Orientadora: Priscila Lupino Gratão

Co Orientadores: Guilherme Lacava de Moura

Lara Yassuko Nakamura

A large, light blue geometric graphic, resembling a stylized globe or a cluster of triangles, is positioned in the background of the text block.

Trabalho apresentado à
Faculdade de Ciências Agrárias e
Veterinárias - UNESP, Câmpus de
Jaboticabal, para graduação em
ENGENHARIA AGRÔNOMICA.

JABOTICABAL – SP
1º Semestre/2026

Z58u

Zerbato, Henrico Augusto Bragante

Uso do silício e *ascophyllum nodosum* na cana energia sob estresse combinado por *leifsonia xyli* e déficit hídrico. / Henrico Augusto Bragante Zerbato. -- Jaboticabal, 2026

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

Orientadora: Priscila Lupino Gratão

1. Cana-de-açúcar. 2. Estresse oxidativo. 3. Irrigação com déficit hídrico. I.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Câmpus de Jaboticabal
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias



AUTOR

Henrico Augusto Bragante Zerbato

TÍTULO DO TRABALHO ACADÊMICO

Uso do silício e *Ascophyllum nodosum* na cana energia sob estresse combinado
por *Leifsonia xyl*i e déficit hídrico

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

Orientadora: Profa. Dra. Priscila Lupino Gratão

Coorientadora: Me. Lara Yassuko Nakamura

Área de Concentração: Fisiologia Vegetal

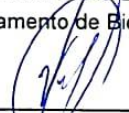
Data da defesa: 09/06/2026

(x) Aprovado

() Reprovado

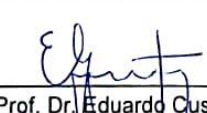
Banca Examinadora:


Profa. Dra. Priscila Lupino Gratão
Departamento de Biologia – FCAV/UNESP


Me. Carlos Vital Gonzalez Porras
Doutorando em Agronomia (Produção Vegetal) – FCAV/UNESP


Dr. Heytor Lemos Martins
Pós-doutorado em Agronomia (Produção Vegetal) – FCAV/UNESP

Aprovado em reunião do Conselho do Departamento em: 08/07/2026


Prof. Dr. Eduardo Custódio Gasparino
Chefe do Departamento

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder força, sabedoria e perseverança ao longo de toda essa caminhada acadêmica.

À minha família, por todo amor, apoio, incentivo e compreensão nos momentos mais difíceis. Vocês foram minha base e minha motivação para continuar buscando meus objetivos. Cada conquista alcançada também pertence a vocês.

Aos meus orientadores, pela dedicação, paciência, ensinamentos e confiança depositada em mim durante o desenvolvimento deste trabalho. Sou grato por toda orientação e contribuição para minha formação acadêmica e profissional.

À Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal, por proporcionar estrutura, conhecimento e oportunidades que contribuíram significativamente para minha trajetória acadêmica e pessoal.

A todos os professores, colegas e amigos que, de alguma forma, fizeram parte desta etapa e contribuíram para meu crescimento, deixo aqui minha sincera gratidão.

RESUMO

Este estudo avaliou a influência da qualidade do material propagativo e da aplicação de agentes atenuantes (silício e extrato de alga) sobre as respostas fisiológicas, bioquímicas e biométricas da cana-energia (VERTIX 12) submetida a estresse biótico (*Leifsonia xyli subsp. xyli* – Lxx), estresse abiótico (déficit hídrico) e à combinação desses fatores. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, em delineamento de blocos casualizados, em esquema fatorial 2×2×3, com 12 tratamentos e 3 repetições. Foram utilizados dois tipos de material propagativo (mudas pré-brotadas indexadas – MPB, isentas de Lxx; e colmos convencionais contaminados), dois regimes hídricos (40% e 80% da capacidade de campo) e três atenuantes (silício, extrato de alga e controle). Foram avaliados, a altura, diâmetro do colmo, biomassa seca, pigmentos fotossintéticos (clorofilas a, b, total, feofitinas e carotenoides), estresse oxidativo (H_2O_2 e MDA) e prolina. Os resultados demonstraram que o déficit hídrico foi o principal fator limitante, reduzindo a massa seca total em 37,7% e degradando as clorofilas total em 34,5% e 37,2%, respectivamente. A associação entre Lxx e déficit hídrico intensificou os danos, com redução de 12,5% no diâmetro do colmo e aumento de 51% na feofitina total no material convencional sob seca. O extrato de alga reduziu H_2O_2 em 56,4%, MDA em 50,7% e prolina em 17% em plantas com Lxx sob déficit, indicando proteção contra danos oxidativos e ajuste osmótico, mas sua eficácia foi dependente do background biótico. O silício beneficiou a clorofila a apenas em irrigação plena (+37%). Conclui-se que o déficit hídrico é o fator predominante, enquanto o material propagativo inadequado potencializa os danos quando associado à seca. Recomenda-se o uso de MPB indexadas como prática prioritária, associado ao manejo hídrico

adequado, e a aplicação de extrato de alga como ferramenta complementar em áreas com histórico de infecção por Lxx.

Palavras-chave: cana-energia, déficit hídrico, *Leifsonia xyli subsp. xyli*, estresse oxidativo, mudas pré-brotadas, silício, extrato de alga.

Abstract

The use of contaminated propagative material may compromise the physiological performance of sugarcane by increasing susceptibility to biotic and abiotic stresses. This study evaluated the influence of propagative material quality and the application of mitigating agents (silicon and seaweed extract) on the physiological, biochemical, and biometric responses of energy cane (VERTIX 12) subjected to biotic stress caused by *Leifsonia xyli subsp. xyli* (Lxx), water deficit, and the combination of both factors. The experiment was conducted under greenhouse conditions using a randomized block design in a $2 \times 2 \times 3$ factorial arrangement, comprising two propagative materials (indexed pre-sprouted seedlings and conventional stalks contaminated with Lxx), two water regimes (40% and 80% of field capacity), and three mitigating treatments (silicon, *Ascophyllum nodosum* seaweed extract, and control). Plant height, stalk diameter, dry biomass, photosynthetic pigments, oxidative stress indicators (H_2O_2 and MDA), and proline accumulation were evaluated. Water deficit was identified as the main limiting factor, reducing total dry biomass by 37.7% and decreasing chlorophyll b and total chlorophyll contents by 34.5% and 37.2%, respectively. The interaction between Lxx infection and water deficit intensified physiological damage, resulting in a 12.5% reduction in stalk diameter and a 51% increase in total pheophytin content in conventional propagative material under drought conditions. The seaweed extract reduced H_2O_2 , MDA, and proline levels by 56.4%, 50.7%, and 17%, respectively, in infected plants under water deficit, indicating mitigation of oxidative damage and osmotic adjustment. Silicon promoted higher chlorophyll a content only under adequate irrigation conditions. The results demonstrate that water deficit is the predominant stress factor

affecting energy cane performance, while contaminated propagative material intensifies damage when associated with drought stress. Therefore, the use of indexed pre-sprouted seedlings should be prioritized to improve crop resilience, while seaweed extract may serve as a complementary strategy in areas with a history of Lxx infection.

Keywords: Energy cane; water deficit; *Leifsonia xyli subsp. xyli*; oxidative stress; pre-sprouted seedlings; silicon; seaweed extract.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	7
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	9
2.1 Qualidade do material propagativo na cultura da cana-de-açúcar	9
2.2 Raquitismo da soqueira e seus impactos fisiológicos na cana-de-açúcar....	12
2.3 Déficit hídrico e respostas fisiológicas da cana-de-açúcar.....	15
2.4 Estresses combinados e estresse oxidativo em planta.....	17
2.5 Sistema antioxidante e indicadores bioquímicos do estresse oxidativo.....	19
2.6 Estratégias de mitigação do estresse oxidativo em plantas	22
2.6.1 Silício	22
2.6.2 Extratos de algas como bioestimulantes	23
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	25
3.1 Local de condução e condições experimentais	25
3.2 Material vegetal e obtenção das mudas	26
3.3 Implantação e condução do experimento	27
3.4 Delineamento experimental e tratamentos.....	29
3.5 Aplicação dos atenuantes.....	31
3.6 Imposição do déficit hídrico	32
3.7 Inoculação e quantificação de <i>Leifsonia xyli subsp. xyli</i>	32
3.8 Avaliações biométricas	34
3.9 Avaliações bioquímicas	34
3.10 Análises Estatísticas	36
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	37
4.1 Altura	37
4.2 Diâmetro do colmo	38
4.3 Biomassa seca	41
4.4 Pigmentos fotossintéticos e degradação da clorofila	42
4.5 Estresse oxidativo (H ₂ O ₂ e MDA) e ajuste osmótico (prolina)	47
5. CONCLUSÃO.....	52
6. REFERÊNCIAS.....	54

1. INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) é uma cultura propagada vegetativamente, através do uso de segmentos de colmos contendo gemas viáveis, que serão utilizadas para o estabelecimento de novas lavouras. Em razão dessa característica, a qualidade do material propagativo exerce influência direta sobre o desenvolvimento inicial das plantas, o estande da cultura, a longevidade do canavial e o potencial produtivo ao longo dos ciclos de cultivo (BRAGA JÚNIOR et al., 2023).

Além dos aspectos fisiológicos e genéticos, a qualidade fitossanitária das mudas é considerada um dos principais fatores para o sucesso do sistema produtivo, uma vez que diversos patógenos pode ser transmitidos de forma eficiente por meio do material de plantio (LANDELL et al., 2021).

A utilização contínua de material propagativo contaminado favorece um processo conhecido como “degeneração varietal”, que é caracterizado pela redução gradual do potencial produtivo da cultura em decorrência do acúmulo de patógenos sistêmicos, alterações fisiológicas e perda da qualidade sanitária das mudas ao longo das sucessivas multiplicações vegetativas (TOKESHI; RAGO, 2006; BRAGA JÚNIOR et al., 2023).

Entre os principais agentes envolvidos nesse processo destacam-se a bactéria *Leifsonia xyli subsp. xyli*, causadora do raquitismo da soqueira, *Xanthomonas albilineans*, responsável pela escaldadura das folhas, e o vírus do mosaico da cana (SCMV), que podem comprometer significativamente o crescimento e a produtividade dos canaviais (LANDELL et al., 2021; BRAGA JÚNIOR et al., 2023).

Com o objetivo de minimizar os efeitos da degeneração varietal e aumentar a qualidade sanitária dos plantios, foram desenvolvidos sistemas de produção de mudas baseados em técnicas de indexação e multiplicação controlada, destacando-se as mudas pré-brotadas (MPBs) (TOKESHI; RAGO, 2006; BRAGA JÚNIOR et al., 2023).

Esse sistema utiliza gemas individualizadas oriundas de viveiros certificados e submetidas a rigoroso controle fitossanitário, possibilitando a obtenção de mudas uniformes, vigorosas e com elevado padrão de sanidade (LANDELL et al., 2021). Além de reduzir a disseminação de doenças, o uso de MPBs proporciona melhor estabelecimento inicial da cultura, maior uniformidade de brotação e maior eficiência na utilização do material propagativo.

Em contraste, o sistema convencional de plantio utiliza colmos inteiros ou frações de colmos provenientes de áreas comerciais, frequentemente sem certificação sanitária ou monitoramento adequado da presença de patógenos. Embora seja amplamente adotado em função da simplicidade operacional e do menor custo inicial, esse método apresenta maior risco de disseminação de doenças sistêmicas e contribui para a manutenção do processo de degeneração varietal, especialmente quando o material utilizado é proveniente de viveiros com baixa qualidade fitossanitária (BRAGA JÚNIOR et al., 2023).

Diversos estudos demonstram que a qualidade do material propagativo está diretamente relacionada ao desempenho agrônômico da cultura, onde os plantios estabelecidos com mudas sadias apresentam maior vigor inicial, melhor desenvolvimento radicular, maior perfilhamento e maior produtividade de colmos quando comparados àqueles originados de materiais contaminados (LANDELL et al., 2021; REIS, V. U. V., et al., 2022).

Além disso, a utilização de mudas de elevada qualidade sanitária contribui para a redução das perdas causadas por doenças sistêmicas e para o aumento da longevidade dos canaviais, constituindo uma das principais estratégias para a sustentabilidade e a competitividade da produção sucroenergética (BRAGA JÚNIOR et al., 2023).

Nesse contexto, a comparação entre mudas pré-brotada e material propagativo convencional torna-se relevante para compreender como a qualidade fitossanitária inicial influencia as respostas fisiológicas, bioquímicas e biométricas da cana-energia submetida a diferentes condições de estresse.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Qualidade do Material Propagativo na Cultura da Cana-de-Açúcar

A qualidade do material propagativo é um dos principais fatores que determinam o sucesso da implantação e da produtividade dos canaviais. Como a cana-de-açúcar é propagada vegetativamente por meio de colmos contendo gemas viáveis, a utilização de mudas saudáveis e vigorosas favorece a brotação, o desenvolvimento inicial das plantas, a uniformidade do estande e a expressão do potencial genético das variedades cultivadas. Por outro lado, o uso contínuo de material proveniente de áreas comerciais pode favorecer a degeneração varietal, processo caracterizado pela redução gradual da produtividade em razão do acúmulo de patógenos sistêmicos e da perda da qualidade fitossanitária do material propagativo ao longo de sucessivos ciclos de multiplicação vegetativa.

Entre os principais agentes envolvidos nesse processo, destaca-se a bactéria *Leifsonia xyli* subsp. *xyli* (Lxx), causadora do raquitismo da soqueira

(RSD – *Ratoon Stunting Disease*), considerada uma das doenças de maior impacto econômico para a cultura em todo o mundo, tendo sido responsável por perdas superiores a dois bilhões de dólares no estado de São Paulo nos últimos trinta anos (URASHIMA; GANEM JÚNIOR; MARCHETTI; GAGLIARDI, 2004). Sua disseminação ocorre exclusivamente por meio de toletes contaminados ou por contato mecânico entre plantas, não havendo, até o momento, variedades comerciais imunes à doença (PONTE et al., 2004; URASHIMA; GRACHET, 2010). O caráter assintomático ou de sintomatologia inespecífica do RSD — que se manifesta como crescimento irregular, afilamento e encurtamento de colmos, além de maior sensibilidade a períodos de déficit hídrico — dificulta sua identificação em campo, permitindo que o patógeno seja transmitido de forma silenciosa de geração em geração de mudas (URASHIMA et al., 2004). Como consequência, observam-se redução do vigor vegetativo, comprometimento do sistema vascular, menor desenvolvimento das plantas e diminuição da longevidade econômica dos canaviais, com perdas que se intensificam à medida que aumenta a idade do talhão e o número de cortes sucessivos (PONTE; SILVEIRA; CARNEIRO; LIMA, 2010).

Com o objetivo de minimizar esses problemas, foi desenvolvida pelo Instituto Agrônomo (IAC) a tecnologia das mudas pré-brotadas (MPB), produzidas a partir de minirrebolos individualizados (fragmentos de colmo contendo uma única gema) obtidos de material certificado e submetido a rigoroso controle sanitário, frequentemente associado à termoterapia como método complementar de eliminação de patógenos sistêmicos (LANDELL et al., 2012; URASHIMA; GRACHET, 2010). Esse sistema proporciona maior uniformidade nas linhas de plantio, melhor estabelecimento inicial das plantas, redução do

número de falhas no estande, menor risco de disseminação de pragas e doenças, e maior eficiência na multiplicação rápida de novas variedades (LANDELL et al., 2012; BRAGA; SEVERIANO, 2016; KOHLER et al., 2020). Outra vantagem expressiva da tecnologia é a redução drástica no volume de material propagativo necessário: enquanto o sistema convencional demanda entre 18 e 20 toneladas de mudas por hectare, o emprego de MPB reduz esse consumo para aproximadamente 2 toneladas por hectare — uma economia de até 90% —, o que viabiliza maior racionalização logística e econômica na implantação de viveiros e na renovação de áreas comerciais (DE MARCO et al., 2017; GOMES, 2018; OLIVEIRA et al., 2018).

Em contrapartida, o sistema convencional, baseado no uso direto de colmos provenientes de áreas comerciais, apresenta maior risco de contaminação por patógenos sistêmicos e acelera o processo de degeneração varietal, sobretudo quando não há monitoramento fitossanitário adequado nas áreas de multiplicação (PONTE et al., 2010). Levantamentos realizados em regiões produtoras do Espírito Santo, sul da Bahia e oeste de Minas Gerais constataram a presença de *L. xyli* subsp. *xyli* em mais de 67% dos talhões amostrados, com incidência de colmos infectados aumentando progressivamente conforme a idade de corte — evidência direta de como a multiplicação contínua de material sem controle sanitário potencializa a disseminação da doença (PONTE et al., 2010).

Diversos estudos demonstram que a utilização de material propagativo de alta qualidade, como o produzido pelo sistema MPB, resulta em maior perfilhamento, melhor desenvolvimento radicular e maior produção de biomassa

inicial (OTTO, R., et al., (2022); SANTI et al., 2016). Além disso, plantas originadas de mudas sadias apresentam maior capacidade de tolerar condições adversas, como o déficit hídrico, enquanto materiais contaminados por patógenos sistêmicos tendem a sofrer perdas produtivas mais acentuadas em razão da interação entre estresses bióticos e abióticos, já que o comprometimento do sistema vascular causado pela colonização bacteriana reduz a eficiência do transporte de água e nutrientes justamente nos períodos de maior demanda hídrica (URASHIMA et al., 2004; PONTE et al., 2010). Dessa forma, a adoção de mudas com elevada qualidade sanitária, especialmente as produzidas por meio da tecnologia de MPB, constitui estratégia fundamental para aumentar a produtividade, reduzir perdas causadas por doenças e garantir a sustentabilidade da produção de cana-de-açúcar

2.2 Raquitismo da soqueira e seus impactos fisiológicos na cana-de-açúcar

O raquitismo da soqueira (RSD) é considerado uma das doenças bacterianas mais importantes da cultura da cana-de-açúcar, em razão de sua ampla distribuição geográficas, da dificuldade de diagnóstico em campo e das perdas produtivas que pode ocasionar. Seu agente causal é *Leifsonia xyli subsp. xyli*(Lxx), uma bactéria gram-positiva, aeróbia, de crescimento lento e restrita aos vasos do xilema, característica essa que confere à doença comportamento sistêmico e favorece sua permanência nas plantas infectadas por longos períodos (TOKESHI; RAGO, 2006; MANIMEKALAI et al., 2023).

A principal forma de disseminação da bactéria ocorre por meio da utilização de material propagativo contaminado, e, além disso, as operações de corte e manejo que promovem ferimentos nos colmos podem contribuir para a transmissão mecânica do patógeno entre plantas e áreas de cultivo (LANDELL et al., 2021). Em virtude da propagação vegetativa da cana-de-açúcar, a utilização sucessiva de mudas infectadas favorece a perpetuação da bactéria nos canaviais e a disseminação silenciosa da doença ao longo dos ciclos produtivos (TOKESHI; RAGO, 2006; LANDELL et al., 2021).

Após a infecção, a *Leifsonia xyli subsp. xylicoloniza* exclusivamente os vasos do xilema, onde forma populações bacterianas capazes de interferir no transporte de água e nutrientes, essa colonização provoca restrições hidráulicas que comprometem o funcionamento fisiológico das plantas e reduzem sua capacidade de responder adequadamente às condições ambientais adversas (TEIXEIRA et al., 2022). Como consequência, observa-se redução do crescimento vegetativo, menor desenvolvimento dos colmos e prejuízos ao desempenho agrônômico da cultura.

Uma das principais dificuldades associadas ao raquitismo da soqueira é a ausência de sintomas externos característicos, onde, em muitos casos, as plantas infectadas permanecem assintomáticas, dificultando a identificação da doença em condições de campo, e quando presentes, os sintomas geralmente incluem encurtamento dos entrenós, redução do porte das plantas, perfilhamento desuniforme e menor desenvolvimento vegetativo, características que podem ser confundidas com limitações nutricionais ou estresses ambientais (LANDELL et al., 2021).

Os impactos econômicos da doença estão relacionados principalmente à redução da produtividade dos canaviais, pois em condições favoráveis à infecção e dependendo da suscetibilidade varietal, as perdas podem tornar-se expressivas devido à redução da produção de colmos e ao comprometimento da longevidade das soqueiras (TEIXEIRA et al., 2022).

Portanto, a manutenção de plantas infectadas ao longo dos ciclos de cultivo favorece a queda gradual do potencial produtivo e contribui para o processo de degeneração varietal observado em áreas conduzidas com material propagativo contaminado (LANDELL et al., 2021; MANIMEKALAI et al., 2023).

Além dos prejuízos produtivos, estudos recentes demonstram que a infecção por Lxx promove importantes alterações fisiológicas nas plantas, pois a restrição do fluxo hídrico compromete processos como fotossíntese, trocas gasosas e absorção de nutrientes, favorecendo a ocorrência de estresse oxidativo (SILVA et al., 2019). Como consequência, ocorre aumento da produção de espécies reativas de oxigênio (ERO), comprometimento do equilíbrio redox celular e redução da capacidade de tolerância das plantas a condições adversas, especialmente quando associadas ao déficit hídrico (SILVA et al., 2019; TEIXEIRA et al., 2022; RAZA et al., 2022).

Paralelamente às alterações fisiológicas, a infecção por Lxx também está associada a modificações hormonais que afetam diretamente o crescimento e o desenvolvimento vegetal, através da redução dos níveis de hormônios promotores de crescimento, como as auxinas e giberelinas, acompanhada pelo aumento da concentração de ácido abscísico, que é o hormônio relacionado às respostas ao estresse (SILVA et al., 2019; TEIXEIRA et al., 2022)

Essas alterações contribuem para a redução da expansão celular, da atividade fotossintética e do crescimento dos colmos, intensificando os efeitos negativos da doença sobre o desempenho produtivo da cultura, dessa forma, o raquitismo da soqueira deve ser compreendido não apenas como uma doença vascular, mas como um fator capaz de promover alterações fisiológicas, bioquímicas e hormonais que comprometem o crescimento, a produtividade e a adaptação da cana-de-açúcar a diferentes condições de estresse. (MANIMEKALAI et al., 2023; SILVA et al., 2025). Esse cenário, portanto, torna a utilização de material propagativo sadio uma das principais estratégias para a redução dos impactos da doença nos sistemas de produção sucroenergéticos (LANDELL et al., 2021; TEIXEIRA et al., 2022).

2.3 Déficit hídrico e respostas fisiológicas da cana-de-açúcar

O déficit hídrico é considerado um dos principais fatores limitantes da produtividade da cana-de-açúcar, especialmente em regiões sujeitas à irregularidade das precipitações e à ocorrência de períodos prolongados de estiagem, que, embora a cultura apresente relativa capacidade de adaptação às condições de baixa disponibilidade hídrica, a deficiência de água afeta diretamente diversos processos fisiológicos essenciais ao crescimento e desenvolvimento das plantas (DIAS et al., 2021; IPCC, 2023).

Uma das primeiras respostas fisiológicas ao déficit hídrico é o fechamento dos estômatos, mecanismo que visa reduzir a perda de água por transpiração e preservar o estado hídrico dos tecidos vegetais, no entanto, essa resposta também limita a entrada de dióxido de carbono (CO_2) nas folhas, reduzindo a

disponibilidade do substrato necessário para a fotossíntese (TEIXEIRA et al., 2022; VERMA et al., 2021).

Portanto, a redução da condutância estomática provoca diminuição da taxa fotossintética e da assimilação de carbono, comprometendo a produção de fotoassimilados necessários para o crescimento da planta. Como consequência, observa-se redução do desenvolvimento vegetativo, menor expansão foliar, diminuição do crescimento radicular e redução do acúmulo de biomassa (TEIXEIRA et al., 2022; VERMA et al., 2021).

Além dos efeitos sobre as trocas gasosas, o déficit hídrico promove alterações metabólicas que afetam o funcionamento celular e o equilíbrio fisiológico das plantas; essas alterações incluem mudanças no metabolismo energético, na síntese de compostos osmoprotetores e na utilização de reservas metabólicas, mecanismos que contribuem para a adaptação da planta às condições de escassez de água (PAULA, 2019; MORAIS et al., 2018).

Os efeitos fisiológicos e metabólicos provocados pelo déficit hídrico refletem diretamente no desempenho produtivo da cultura, portanto, a redução da fotossíntese, do crescimento vegetativo e do acúmulo de biomassa compromete a formação e o desenvolvimento dos colmos, resultando em menores produtividades e redução do potencial econômico da cultura, principalmente quando a deficiência hídrica ocorre em fases críticas do desenvolvimento da cana-de-açúcar (DIAS et al., 2021; TEIXEIRA et al., 2022; VERMA et al., 2021).

2.4 Estresses combinados e estresse oxidativo em plantas

Em condições de campo, as plantas frequentemente são expostas simultaneamente a múltiplos fatores de estresse, tornando suas respostas fisiológicas mais complexas do que aquelas observadas sob condições isoladas, onde, na cultura da cana-de-açúcar, a ocorrência concomitante do raquitismo da soqueira causada por *Leifsonia xyli subsp. xyli* (Lxx), e do déficit hídrico representa uma condição particularmente severa, uma vez que ambos os fatores afetam diretamente a dinâmica de absorção e transporte de água na planta (RAZA et al., 2022; MARQUES, et al., 2022)

A bactéria Lxx coloniza exclusivamente os vasos do xilema, comprometendo o fluxo de água e nutrientes entre as raízes e a parte aérea, e quando essa condição ocorre simultaneamente à redução da disponibilidade hídrica no solo, as limitações ao transporte de água tornam-se ainda mais intensas, agravando os efeitos fisiológicos do estresse e reduzindo a capacidade adaptativa das plantas (TEIXEIRA et al., 2022; MANIMEKALAI et al., 2023).

Então, a restrição hídrica imposta pela combinação desses fatores afeta diretamente os processos metabólicos essenciais, incluindo as trocas gasosas, a assimilação de carbono e a atividade fotossintética e traz como consequência, um desequilíbrio metabólico caracterizado pela redução da eficiência energética celular e pelo comprometimento de diversos processos bioquímicos relacionados ao crescimento e ao desenvolvimento vegetal (SILVA et al., 2019; TEIXEIRA et al., 2022).

Uma das principais consequências desse desequilíbrio é o aumento da produção de espécies reativas de oxigênio (ERO), como o radical superóxido

(O_2^-), o peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e a radical hidroxila (OH), pois, embora essas moléculas sejam produzidas naturalmente durante o metabolismo celular e desempenhem funções importantes na sinalização fisiológica, sua produção excessiva sob condições de estresse resulta em acúmulo intracelular e perda do equilíbrio redox (MANIMEKALAI et al., 2023; SILVA et al., 2025).

O estresse oxidativo ocorre quando a geração de ERO excede a capacidade de neutralização dos mecanismos antioxidantes presentes nas células vegetais. Nessa condição, as espécies reativas passam a promover a peroxidação lipídica das membranas celulares, a oxidação de proteínas, alterações em ácidos nucleicos e a degradação de pigmentos fotossintéticos, comprometendo a integridade estrutural e funcional dos tecidos vegetais (SILVA et al., 2025; TEIXEIRA et al., 2022).

Na cana-de-açúcar, os danos provocados pelo estresse oxidativo refletem-se na redução da eficiência fotossintética, no comprometimento do metabolismo celular, na diminuição do crescimento vegetativo e na queda da produtividade. Além disso, a persistência dessas condições pode acelerar processos de senescência e reduzir a capacidade de resposta da planta a novos desafios ambientais, tornando o estresse oxidativo um dos principais mecanismos envolvidos nos prejuízos causados pela interação entre o raquitismo da soqueira e o déficit hídrico (SILVA et al., 2019; MANIMEKALAI et al., 2023; RAZA et al., 2022).

Sistema antioxidante e indicadores bioquímicos do estresse oxidativo

As espécies reativas de oxigênio (ERO), como o radical superóxido (O_2^-), o peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e a radical hidroxila (OH), são produzidas naturalmente durante o metabolismo aeróbio das plantas e desempenham

funções importantes na sinalização celular e na regulação de processos fisiológicos (SILVA et al., 2025). Entretanto, sob condições de estresse, a produção dessas moléculas pode aumentar significativamente, promovendo desequilíbrio redox e danos celulares quando os mecanismos de defesa não são capazes de neutralizá-las adequadamente (MANIMEKALAI et al., 2023; SILVA et al., 2025).

Para minimizar os efeitos tóxicos das ERO, as plantas desenvolveram um sistema antioxidante complexo composto por mecanismos enzimáticos e não enzimáticos, que dentre os principais componentes do sistema antioxidante enzimático destacam-se a superóxido dismutase (SOD; EC 1.15.1.1), responsável pela conversão do radical superóxido em peróxido de hidrogênio; a catalase (CAT; EC 1.11.1.6), que promove a decomposição do H_2O_2 em água e oxigênio; e a ascorbato peroxidase (APX; EC 1.11.1.11), enzima que atua na remoção do peróxido de hidrogênio utilizando o ascorbato como doador de elétrons oxidativos (CHECCHIO et al., 2021; OLIVEIRA et al., 2021; TEIXEIRA et al., 2022).

A ação coordenada dessas enzimas é fundamental para a manutenção da homeostase celular e para a proteção dos tecidos vegetais contra danos oxidativos, que além desses mecanismos enzimáticos, as plantas dispõem de antioxidantes não enzimáticos que contribuem para a neutralização das ERO e para a manutenção do equilíbrio redox celular (CHECCHIO et al., 2021; OLIVEIRA et al., 2021; TEIXEIRA et al., 2022).

Entre esses compostos destacam-se a glutathiona, os carotenoides, compostos fenólicos e outros metabólitos capazes de atuar diretamente na remoção de espécies reativas ou na regeneração de antioxidantes oxidados,

pois exercem um papel complementar ao sistema enzimático, aumentando a capacidade de tolerância das plantas frente às condições de estresse (MANIMEKALAI et al., 2023; CHECCHIO et al., 2021).

Então a avaliação do estresse oxidativo pode ser realizada por meio de diferentes indicadores bioquímicos, e entre os mais utilizados destaca-se o teor de peróxido de hidrogênio (H_2O_2), considerado um importante marcador do desequilíbrio oxidativo celular. Embora participe de processos de sinalização fisiológica, o acúmulo excessivo de H_2O_2 indica aumento da geração de ERO e potencial ocorrência de danos oxidativos (ALEXIEVA et al., 2001; SILVA et al., 2025).

Outro indicador amplamente utilizado é o malonaldeído (MDA), produto resultante da peroxidação lipídica das membranas celulares, pois o aumento da concentração de MDA reflete a intensidade dos danos provocados pelas ERO sobre os lipídios de membrana, sendo considerado um dos principais marcadores bioquímicos de estresse oxidativo em plantas (ALEXIEVA et al., 2001; SILVA et al., 2019).

A prolina também constitui um importante indicador fisiológico e bioquímico da resposta das plantas ao estresse, esse aminoácido atua no ajuste osmótico, na estabilização de proteínas e membranas celulares e na proteção contra danos oxidativos, então, o acúmulo de prolina se torna frequentemente observado em plantas submetidas ao déficit hídrico e a outros fatores estressantes, sendo amplamente utilizado como indicador da capacidade adaptativa vegetal frente a condições adversas (BATES et al., 1973; PAULA, 2019).

Além dos indicadores bioquímicos, a avaliação dos pigmentos fotossintéticos fornece informações importantes sobre o estado fisiológico das plantas submetidas ao estresse. As clorofilas a e b desempenham papel fundamental na captura da energia luminosa durante a fotossíntese, enquanto os carotenoides atuam tanto na absorção de luz quanto na fotoproteção dos sistemas fotossintéticos, onde sob condições de estresse, ao ocorrer a degradação desses pigmentos a eficiência fotossintética pode comprometer e reduzir o crescimento vegetal (LICHTENTHALER, 1987; HOLM-HANSEN; RIEMANN, 1978).

Durante o processo de degradação das clorofilas podem ser formadas as feofitinas, moléculas resultantes da perda do átomo central de magnésio da estrutura da clorofila, e esse aumento da proporção de feofitinas é frequentemente associado à deterioração do aparato fotossintético e ao agravamento dos danos fisiológicos causados pelo estresse, constituindo um indicador adicional da integridade dos pigmentos fotossintéticos (LICHTENTHALER, 1987).

Dessa forma, a avaliação conjunta das enzimas antioxidantes, dos indicadores bioquímicos de estresse oxidativo e dos pigmentos fotossintéticos permite compreender de maneira integrada os mecanismos de resposta e adaptação das plantas frente às condições de estresse biótico, abiótico ou combinado, fornecem informações fundamentais para a interpretação das respostas fisiológicas observadas na cultura da cana-de-açúcar.

2.6 Estratégias de mitigação do estresse oxidativo em plantas

A exposição das plantas a estresses bióticos e abióticos frequentemente resulta no aumento da produção de espécies reativas de oxigênio (ERO), favorecendo a ocorrência de estresse oxidativo e comprometendo processos fisiológicos essenciais ao crescimento e à produtividade. Nesse contexto, diversas estratégias têm sido estudadas com o objetivo de aumentar a capacidade de tolerância vegetal frente a condições adversas, destacando-se a utilização de compostos capazes de modular o metabolismo antioxidante e estimular mecanismos naturais de defesa, que neste estudo, foram utilizados o silício e o extrato de algas (CHECCHIO et al., 2021; TEIXEIRA et al., 2022).

2.6.1 Silício

O silício (Si) tem sido amplamente reconhecido como um elemento benéfico para diversas culturas agrícolas, especialmente sob condições de estresse, mesmo não sendo considerado essencial para a maioria das espécies vegetais, sua absorção pode promover alterações estruturais, fisiológicas e bioquímicas que aumentam a tolerância das plantas a fatores bióticos e abióticos (VERMA et al., 2021; TEIXEIRA et al., 2022).

Um dos principais mecanismos de ação do silício está relacionado ao seu depósito na parede celular e em tecidos epidérmicos, promovendo maior rigidez estrutural e reforço mecânico dos tecidos vegetais, e essa barreira física dificulta a penetração e o desenvolvimento de patógenos, além de contribuir para a redução da perda excessiva de água pelos tecidos vegetais (VERMA et al., 2021).

Além dos efeitos estruturais, o silício exerce importante papel na regulação do sistema antioxidante, sua aplicação aumenta a atividade de enzimas antioxidantes como superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT) e ascorbato peroxidase (APX), favorecendo a remoção de espécies reativas de oxigênio e reduzindo os danos causados pelo estresse oxidativo (CHECCHIO et al., 2021; OLIVEIRA et al., 2021; TEIXEIRA et al., 2022).

Sob condições de déficit hídrico, o silício contribui para a manutenção do estado hídrico das plantas por meio da melhoria das relações hídricas, da preservação da integridade das membranas celulares e da manutenção da atividade fotossintética, esses efeitos resultam em maior eficiência no uso da água, redução dos danos provocados pela seca e maior estabilidade fisiológica das plantas (TEIXEIRA et al., 2022; VERMA et al., 2021).

Além disso, o silício tem sido associado à redução da severidade de doenças em diversas culturas, pois a combinação entre reforço estrutural, ativação de mecanismos antioxidantes e modulação de respostas de defesa contribui para aumentar a resistência das plantas frente à ação de patógenos e minimizar os prejuízos decorrentes da infecção (CHECCHIO et al., 2021; OLIVEIRA et al., 2021).

2.6.2 Extratos de algas como bioestimulantes

Os extratos de algas marinhas têm recebido crescente atenção como bioestimulantes agrícolas devido à sua capacidade de promover crescimento vegetal e aumentar a tolerância das plantas a diferentes condições de estresse. Dentre as espécies mais utilizadas destaca-se *Ascophyllum nodosum*, uma alga

marinha parda amplamente empregada na formulação de produtos destinados ao manejo fisiológico das culturas (VERMA et al., 2021; JACOMASSI et al., 2022).

Os extratos obtidos de *Ascophyllum nodosum* apresentam composição complexa, contendo diversos compostos bioativos, como fitormônios, aminoácidos, polissacarídeos, betaínas, compostos fenólicos e minerais, esses componentes atuam de forma integrada na regulação do metabolismo vegetal e na modulação das respostas fisiológicas associadas ao crescimento e à adaptação ao estresse (VERMA et al., 2021).

Entre os principais constituintes desses extratos destacam-se substâncias com atividade semelhante à de hormônios vegetais, incluindo auxinas, citocininas e giberelinas, são responsáveis por influenciar processos relacionados à divisão celular, expansão celular, desenvolvimento radicular e manutenção da atividade fotossintética, favorecendo o crescimento e o desempenho fisiológico das plantas em condições adversas (CARVALHO et al., 2014).

Além dos efeitos hormonais, os compostos bioativos presentes nos extratos de *A. nodosum* contribuem para a ativação de mecanismos de defesa e para o fortalecimento do sistema antioxidante vegetal. Estudos demonstram que a aplicação desses produtos pode aumentar a atividade de enzimas antioxidantes, reduzir o acúmulo de espécies reativas de oxigênio e minimizar os danos oxidativos provocados por estresses ambientais (JACOMASSI et al., 2022)

A utilização de extratos de *Ascophyllum nodosum* também está associada à melhoria do crescimento radicular, ao ajuste osmótico e à manutenção da

integridade fisiológica das plantas submetidas a condições de déficit hídrico (CARVALHO et al.,2014). Dessa forma, esses bioestimulantes constituem uma alternativa promissora para aumentar a resiliência das culturas frente aos efeitos combinados dos estresses bióticos e abióticos, contribuindo para sistemas produtivos mais sustentáveis e eficientes (VERMA et al., 2021).

Considerando que tanto o silício quanto os extratos de *Ascophyllum nodosum* apresentam potencial para modular mecanismos antioxidantes e reduzir os efeitos do estresse oxidativo, a avaliação desses agentes torna-se relevante para compreender sua eficiência na mitigação dos danos fisiológicos e bioquímicos provocados pela interação entre o raquitismo da soqueira e o déficit hídrico na cultura da cana-energia (VERMA et al., 2021; CARVALHO et al.,2014; JACOMASSI et al., 2022)

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local de condução e condições experimentais

O experimento foi conduzido em uma casa de vegetação, sendo realizado na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, UNESP Universidade Estadual Paulista, Campus de Jaboticabal – SP, em ambiente protegido no Departamento de Biologia Aplicada à Agropecuária.

3.2 Material vegetal e obtenção das mudas

Para este trabalho foi utilizada a variedade de cana-de-açúcar VERTIX 12 (cana-energia), de ampla representatividade no setor produtivo, e a escolha desse cultivar justifica-se por suas características genéticas distintas das cultivares convencionais que estão associadas a alterações fisiológicas e morfológicas que podem influenciar a resposta a diferentes condições de estresse.

As mudas foram obtidas a partir de duas fontes de material propagativo que se diferenciam quanto à qualidade fitossanitária: mudas pré-brotadas (MBPs) indexadas para as principais doenças sistêmicas.

A confirmação da sanidade das MBPs e da presença de *Leifsonia xyli subsp. xyli* (Lxx) no material convencional foi realizada por meio da técnica sorológica *dot blot*, que permite a detecção qualitativa e semiquantitativa da presença/ausência da bactéria nas amostras vegetais (TOKESHI, 2006).

O protocolo adotado apresenta limite de detecção de 10^6 UFC mL⁻¹, sendo consideradas positivas apenas as amostras com concentrações iguais ou superiores a esse valor, e todas as análises foram realizadas no Laboratório de Biotecnologia do Centro de Cana do Instituto Agrônomo (IAC), em Ribeirão Preto (SP), seguindo os procedimentos padronizados da instituição.

3.3 Implantação e condução do experimento

O experimento foi implantado em 1º de agosto de 2025 e seguiu até 2 fevereiro de 2026 (Tabela 1) em vasos plásticos de 25L contendo substrato, solo e adubação NPK (8-28-16). A adubação foi realizada para garantir condições nutricionais adequadas e uniformes entre as unidades experimentais.

Não foi necessária a correção da acidez (calagem), pois o pH do substrato manteve-se dentro da faixa adequada para o desenvolvimento da cultura (pH 6,5) (Figuras 1, 2 e 3).



Figura 1 – Casa de vegetação nas dependências da FCAV UNESP.



Figura 2 – Casa de vegetação nas dependências da FCAV UNESP.



Figura 3 – Casa de vegetação nas dependências da FCAV UNESP.

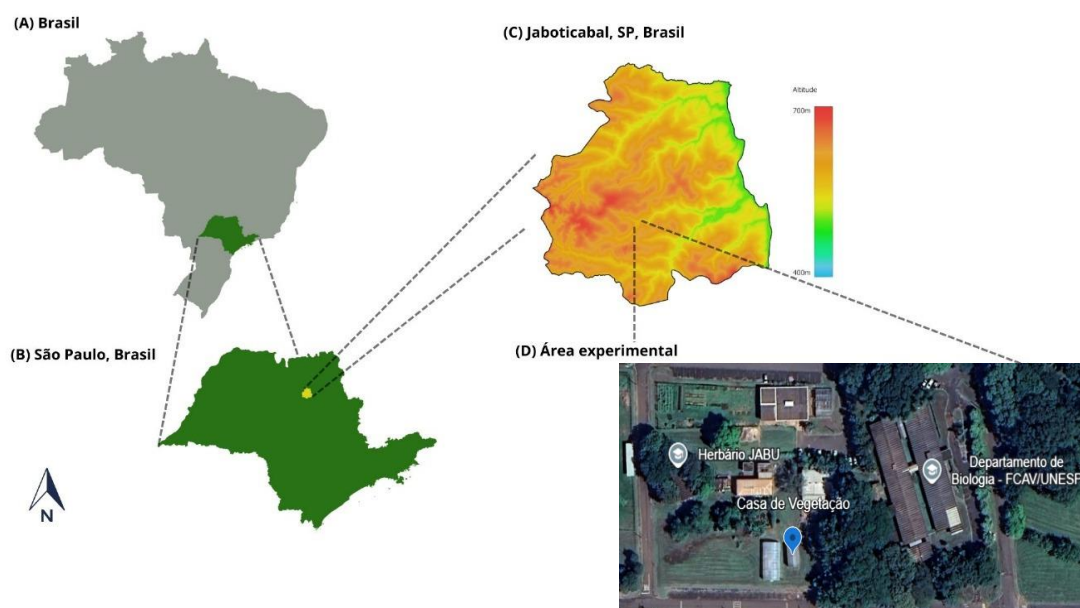


Tabela 1 – Cronograma experimental

	Data
Plantio	01/08/2025
Inoculação com Lxx	26/09/2025
Aplicação de silício	16, 19, 23, 26, 30/12/2025 e 02/01/2026
Aplicação de extrato de alga	23/12/2025
Início do déficit hídrico	13/01/2026
Término do déficit hídrico	02/02/2026
Coleta de dados	02/02/2026

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

3.4 Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento experimental foi realizado em blocos casualizados (DBC) em esquema fatorial $2 \times 2 \times 3$, totalizando 12 tratamentos com 3 repetições, perfazendo 36 unidades experimentais (Figura 4)

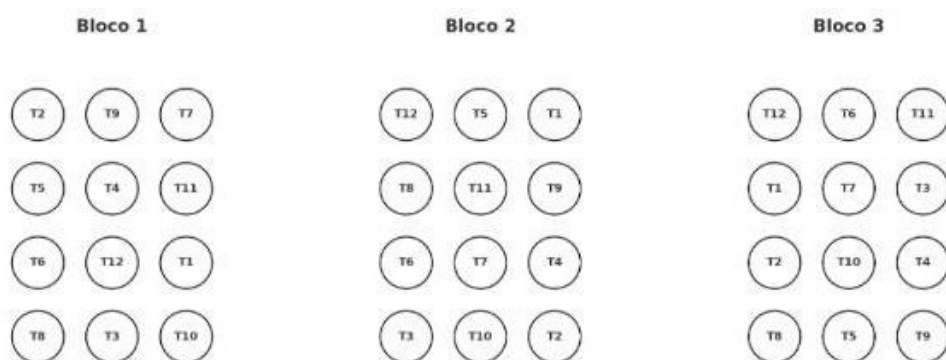


Figura 4 – Esquema de delineamento experimental.

Os fatores avaliados foram:

Fator A – Estresse biótico:

A1 = com inoculação de *Leifsonia xyli* subsp. *xyli*

A2 = sem inoculação

Fator B – Estresse abiótico:

B1 = com déficit hídrico (40% da capacidade de campo)

B2 = sem déficit hídrico (80% da capacidade de campo)

Fator C – Atenuantes:

C1 = Silício (aplicação via fertirrigação)

C2 = Extrato de alga (*Ascophyllum nodosum*)

C3 = Controle (sem aplicação)

A escolha do extrato de algas e do silício entre os diversos produtos disponíveis no mercado foi fundamentada em critérios científicos, agronômicos e práticos, pois, ambos possuem mecanismos de ação bem estabelecidos na literatura e apresentam potencial para atuar tanto na mitigação de estresses abióticos quanto no aumento da tolerância a estresses bióticos, que são os fatores centrais deste estudo (TEIXEIRA et al., 2022; OLIVEIRA et al., 2021a).

O extrato de algas foi selecionado por ser um bioestimulante capaz de promover alterações fisiológicas e metabólicas na planta, sua composição inclui compostos bioativos, como fitormônios, aminoácidos, vitaminas, polissacarídeos e antioxidantes, que favorecem o crescimento vegetal, estimulam a atividade fotossintética, promovem o desenvolvimento radicular e auxiliam na ativação de mecanismos de defesa (SOUZA et al., 2019; SILVA et al., 2025).

O silício, por sua vez, foi escolhido devido ao seu reconhecido papel na promoção da resistência vegetal, e embora não seja considerado um elemento essencial para a maioria das plantas, diversos estudos demonstram seus benefícios na redução dos danos causados por seca, salinidade, temperaturas extremas e ataque de patógenos, atuando por meio do fortalecimento das paredes celulares, da formação de barreiras físicas e da indução de respostas bioquímicas relacionadas à defesa vegetal (CHECCHIO et al., 2021; TEIXEIRA et al., 2022; VERMA et al., 2021; PALMA, 2021).

A comparação entre ambos possibilita uma avaliação mais abrangente das respostas da cana-energia Vertix 12 aos estresses biótico e abiótico, representando estratégias distintas e complementares de mitigação. Além disso, ambos possuem crescente utilização na agricultura moderna, conferindo

potencial aplicação prática aos resultados obtidos (LANDELL et al., 2021; BRAGA JÚNIOR et al., 2023).

3.5 Aplicação dos atenuantes

Os atenuantes foram aplicados via fertirrigação, com o pH da calda ajustado para 6,5. As concentrações e volumes utilizados foram:

Silício (silicato de cálcio): aplicado na concentração de 3 mM, com volume de calda de 100 mL por vaso por aplicação, totalizando seis aplicações (nos dias 16, 19, 23, 26, 30 de dezembro de 2025 e 2 de janeiro de 2026), conforme cronograma da Tabela 1.

Extrato de alga (*Ascophyllum nodosum*): aplicado na concentração de 2,5 mL do produto comercial por litro de água, com volume de calda de 100 mL por vaso, em uma única aplicação em 23 de dezembro de 2025 e a concentração foi definida com base em testes preliminares e recomendações do fabricante.

Ambas as caldas foram preparadas no momento da aplicação e fornecidas diretamente no substrato de cada vaso, evitando a aplicação foliar para padronizar a absorção radicular.

3.6 Imposição do déficit hídrico

O déficit hídrico foi imposto por 14 dias consecutivos (de 13 de janeiro a 2 de fevereiro de 2026), mantendo-se os vasos a 40% da capacidade de campo. Já o monitoramento da umidade foi realizado diariamente por pesagem

gravimétrica (todos os vasos foram pesados durante os 14 dias), e a condição controle (sem déficit)

3.7 Inoculação e quantificação de *Leifsonia xyli subsp. Xyli*

Aos 60 dias após o plantio, iniciou-se a aplicação dos atenuantes via fertirrigação, conforme cronograma descrito na Tabela 1. O silício foi fornecido na concentração de 3 mM (silicato de cálcio), e o extrato de alga (*Ascophyllum nodosum*) na concentração definida em testes preliminares, conforme recomendações comerciais (TEIXEIRA et al., 2022; OLIVEIRA et al., 2021)

Aos 90 dias após o plantio (26 de setembro de 2025), metade das plantas foi inoculada com *Leifsonia xyli subsp. xyli* (Lxx) pelo método de injeção no colmo, na altura do terceiro entrenó a partir da base, utilizando inóculo fornecido pela RIDESA Brasil (UFSCar/PMGCA) e a concentração bacteriana utilizada foi de 10^8 UFC mL⁻¹, com volume de 1 mL por planta, seguindo a metodologia descrita por Tokeshi & Rago (2006).

Ao final do experimento, a presença de Lxx nas plantas inoculadas e não inoculadas foi avaliada por meio da técnica sorológica de dot blot (imunoensaio em membrana), que permite a detecção qualitativa e semiquantitativa da carga bacteriana nos tecidos vegetais. Esse método consiste na adsorção das amostras em membrana de nitrocelulose, seguida do bloqueio de sítios inespecíficos e incubação com anticorpo primário específico para Lxx, seguido de anticorpo secundário conjugado a enzima (TOKESHI & RAGO, 2006).

A adição de substrato cromogênico possibilita a visualização do complexo antígeno anticorpo na forma de um ponto colorido (dot), cuja intensidade é

proporcional à concentração bacteriana, e para a estimativa da carga bacteriana, a intensidade do sinal é comparada a uma curva-padrão obtida a partir de concentrações conhecidas do patógeno, permitindo a classificação das amostras em diferentes faixas de infestação (TOKESHI & RAGO,2006).

As análises foram realizadas no Laboratório de Biotecnologia do IAC/Centro de Cana, em Ribeirão Preto (SP), este protocolo adotado apresenta limite de detecção de 1×10^6 UFC mL⁻¹, sendo consideradas positivas apenas as amostras com concentrações iguais ou superiores a esse valor.

Considerações:

1. A análise se refere às amostras coletadas pela usina e encaminhadas ao laboratório. Não nos responsabilizamos pela coleta do material.
2. Método de Análise: *Dot Blot*: amostras individuais do caldo são impressas em uma membrana, a qual é então submetida ao procedimento de detecção por *Dot Blot*, baseado em reações antígeno-anticorpos específicos para *Leifsonia xyli* subsp. *xyli*, agente causal do raquitismo-da- soqueira. Na presença de um substrato, a reação produzida desenvolve uma coloração azul para a presença da bactéria no caldo, sendo que a intensidade de azul é proporcional à concentração de bactéria, ou seja, quanto mais azul, maior a concentração de bactéria. Como controles positivos, são usados amostras de caldo de cana contaminado.
3. Recomenda-se utilizar como mudas, amostragens com índice de contaminação menor ou igual a 5%.
4. Para material com índice de contaminação maior que 5%, recomendamos proceder o tratamento térmico do viveiro e re-análise do material.
5. Este laudo tem validade de 90 dias.

Conclusão:

As amostras T1B2; T1B3; T2B2;T3B1;T5B1e T6B1 analisadas **apresentaram contaminação NÍVEL IV** por *Leifsonia xyli* subsp. *xyli*, agente causador do raquitismo-da-soqueira.



Dra. Silvana Creste Souza
Diretora Unidade Laboratorial de Referência – Centro de Cana, IAC
Ribeirão Preto – SP.

Devido à sua praticidade, rapidez e confiabilidade, o método é amplamente utilizado na triagem fitossanitária de material propagativo de cana-de-açúcar.

3.8 Avaliações biométricas

As plantas foram avaliadas quanto ao crescimento por meio da determinação da massa seca total, com separação de raiz e parte aérea, onde

a massa seca da parte aérea e das raízes foi obtida após secagem em estufa a 70 °C por 72 horas, utilizando balança analítica (0,0001 g).

O peso do colmo foi mensurado individualmente em balança digital (precisão de 0,001 kg).

3.9 Avaliações bioquímicas

Para avaliar os efeitos dos estresses e a eficiência dos atenuantes, foram determinados parâmetros bioquímicos indicadores do estado fisiológico das plantas, sendo eles: os pigmentos fotossintéticos (clorofilas, carotenoides e feofitinas), peroxidação lipídica (MDA), peróxido de hidrogênio (H₂O₂) e acúmulo de prolina, e seus procedimentos metodológicos são descritos a seguir (MORAIS et al., 2018; PAULA, 2019; RAO et al., 2025):

3.9.1 Pigmentos fotossintéticos

Os discos foliares da quarta folha completamente expandida foram imersos em 2 mL de acetona 80% (v/v) e mantidos a 4 °C por 48 h no escuro. As absorbâncias foram lidas em espectrofotômetro a 663 nm (clorofila a), 647 nm (clorofila b), 470 nm (carotenoides totais), 665 nm (feofitina a) e 653 nm (feofitina b). As concentrações foram calculadas segundo Lichtenthaler (1987):

$$\begin{aligned} C_a &= 12,25 \cdot A_{663} - 2,79 \cdot A_{647} \\ C_b &= 21,50 \cdot A_{647} - 5,10 \cdot A_{663} \\ C_{car} &= \frac{1000 \cdot A_{470} - 1,82 \cdot C_a - 85,02 \cdot C_b}{198} \end{aligned}$$

3.9.2 Estresse oxidativo

O teor de malonaldeído (MDA) foi avaliado pelo teor de substâncias reativas ao ácido tiobarbitúrico (TBARS), conforme Heath et al. (1968). As

Amostras de 0,2 g de tecido do colmo foram maceradas em 2 mL de ácido tricloroacético (TCA) 0,1% (p/v) e centrifugadas a $10.000 \times g$ por 15 min a 4 °C (MORAIS et al., 2018; SILVA et al., 2019).

O sobrenadante (1 mL) foi misturado a 4 mL de TCA 20% contendo 0,5% de ácido tiobarbitúrico (TBA) e aquecido a 95 °C por 30 min e após resfriamento em gelo e nova centrifugação, a absorbância foi lida a 535 nm e corrigida a 600 nm. Por fim, a concentração de MDA foi calculada usando coeficiente de extinção molar de $1,55 \times 10^5 \text{ M}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ e expressa em $\mu\text{mol MDA g}^{-1}$ de massa fresca.

O teor de H_2O_2 foi determinado segundo Alexieva et al. (2001) e amostras de 0,2 g de tecido do colmo foram homogeneizadas em 2 mL de TCA 0,1% e centrifugadas a $10.000 \times g$ por 15 min a 4 °C.

Em um tubo de ensaio, 0,5 mL do sobrenadante foram misturados com 0,5 mL de tampão fosfato de potássio 100 mM (pH 7,0) e 1 mL de KI 1 mol L^{-1} , esta reação foi mantida no escuro por 1 h, e a absorbância lida a 390 nm.

Por fim, a concentração de H_2O_2 foi calculada por curva de calibração e expressa em $\mu\text{mol H}_2\text{O}_2 \text{ g}^{-1}$ de massa fresca (ALEXIEVA et al., 2001; MANIMEKALAI et al., 2023).

3.9.3 Prolina

O conteúdo de prolina foi determinado conforme metodologia descrita anteriormente, onde as amostras de 0,5 g de massa seca do colmo foram maceradas em 10 mL de ácido sulfossalicílico 3% (p/v) e filtradas BATES et al., 1973; PAULA, 2019).

Dois mililitros do filtrado foram misturados com 2 mL de ácido acético glacial e 2 mL de reagente de ninhidrina ácida, esta a mistura foi aquecida a 100 °C por 1 h, resfriada em gelo e extraída com 4 mL de tolueno. E a absorbância

da fase orgânica foi lida a 520 nm, e a concentração de prolina determinada por curva padrão, expressa em μmol prolina g^{-1} de massa seca BATES et al., 1973; PAULA, 2019).

3.10 Análises estatísticas

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) utilizando o software AgroEstat (versão 1.0), considerando o delineamento em blocos casualizados (DBC) em esquema fatorial $2 \times 2 \times 3$ e as fontes de variação avaliadas compreenderam os efeitos principais dos fatores estresse biótico, estresse abiótico e atenuantes, bem como suas interações duplas e triplas, além do efeito de blocos.

Quando a ANOVA indicou efeito significativo ($p < 0,05$), as médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, a fim de identificar quais diferiram estatisticamente entre si.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Altura

A altura não apresentou diferenças significativas entre os tratamentos ($p > 0,05$), nem o déficit hídrico, nem os atenuantes, nem o material propagativo afetaram o alongamento caulinar conforme apresentado no Imagem 1 a seguir:

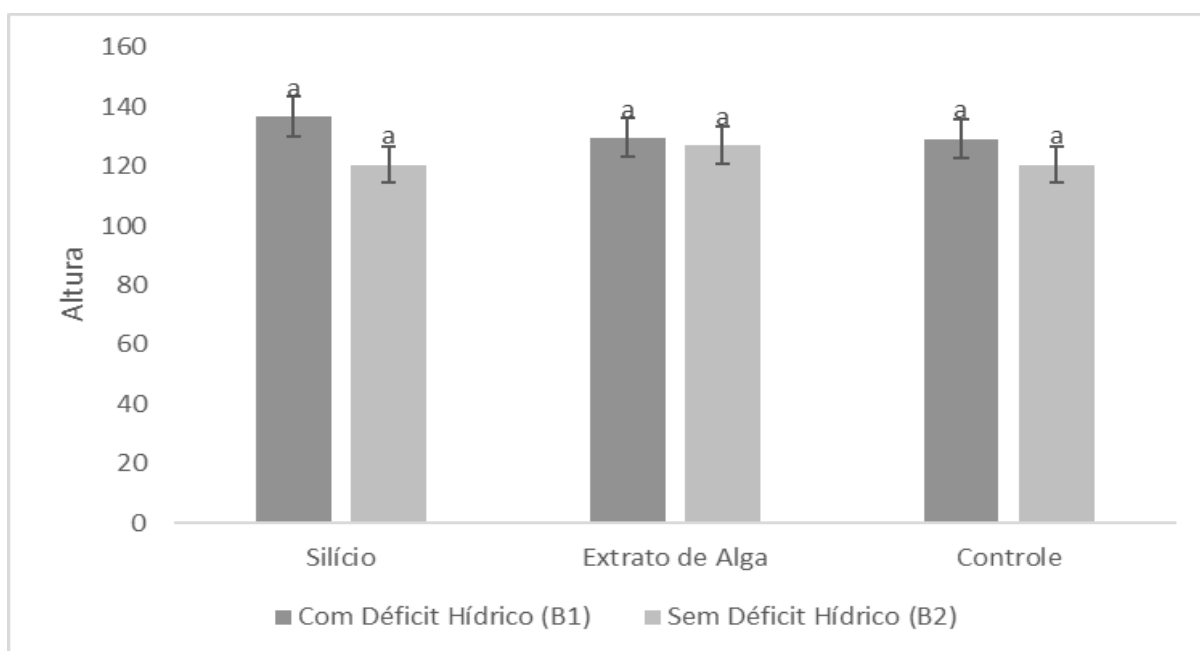


Imagem 1 - Altura

Nota: Médias seguidas por letras minúsculas distintas na mesma coluna (comparando regimes hídricos) e letras maiúsculas distintas na mesma linha (comparando atenuantes) diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Esse resultado está de acordo com Alexieva et al. (2001), que observaram que o alongamento caulinar pode ser preservado em estresses de curta duração, à custa de outros parâmetros, como diâmetro e biomassa. No presente estudo, os 14 dias de déficit podem ter sido insuficientes para comprometer o turgor necessário à altura, ou a planta priorizou esse processo em detrimento do crescimento secundário.

Então, a ausência de efeito sobre a altura indica que esse parâmetro não é um bom indicador de estresse no período avaliado, devendo-se priorizar variáveis como diâmetro e biomassa para diagnóstico precoce.

Do ponto de vista prático, a avaliação da altura isoladamente não deve ser usada como critério para decisões de manejo, sendo recomendada a combinação com outros biomarcadores, pois, além disso, a manutenção da altura mesmo sob estresse severo, sugere que a planta ativa mecanismos de

escape que podem mascarar danos iniciais, reforçando a necessidade de monitoramento integrado.

4.2 Diâmetro do colmo

Houve interação significativa entre material propagativo e déficit hídrico ($p = 0,0412$), pois o diâmetro do material convencional sob déficit (18,12 mm) apresentou uma redução de 12,5% menor que o MPB na mesma condição (20,24 mm) e 18,0% menor que o convencional irrigado (22,11 mm), já as MPB mantiveram diâmetro estável entre regimes hídricos.

A Tabela 1 a seguir apresenta os resultados relacionados a variável diâmetro do colmo.

Tabela 1 - Valores médios do diâmetro do colmo (mm) de plantas de cana-energia (variedade VERTIX 12) em função do Material Propagativo e Estresse Abiótico.

Tipo de Material Propagativo	Com Déficit Hídrico (B1)	Sem Déficit Hídrico (B2)
Mudas MPB (Sem Lxx)	20,24 $\pm$ 2,51aA	20,13 $\pm$ 2,05aA
Convencional (Com Lxx)	18,12 $\pm$ 3,12bB	22,11 $\pm$ 2,90aA
CV (%)	14,07%	-

Nota: Letras minúsculas distintas na mesma coluna (comparando materiais) e letras maiúsculas distintas na mesma linha (comparando regimes hídricos) diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ($p < 0,05$). Valores expressos como Média $\pm$ Desvio Padrão.

Portanto, essa redução expressiva no material contaminado sob seca evidencia comprometimento vascular, agravado pela presença de *L. xyli* somada à baixa disponibilidade hídrica, conforme apresentado por Tokeshi & Rago

(2006) e Raza et al. (2022). A manutenção do diâmetro nas MPB confirma que a ausência do patógeno preserva a integridade do xilema.

Diferenciando-se dos estudos com silício em seca moderada (Verma et al., 2021), onde os atenuantes não influenciaram essa variável, sugerindo que a severidade do déficit (40% CC) superou seus efeitos

Este resultado (Imagem 2) confirma a hipótese de que o material propagativo inadequado interfere em parâmetros específicos do crescimento, especialmente na integridade do sistema vascular, dependendo das condições ambientais.

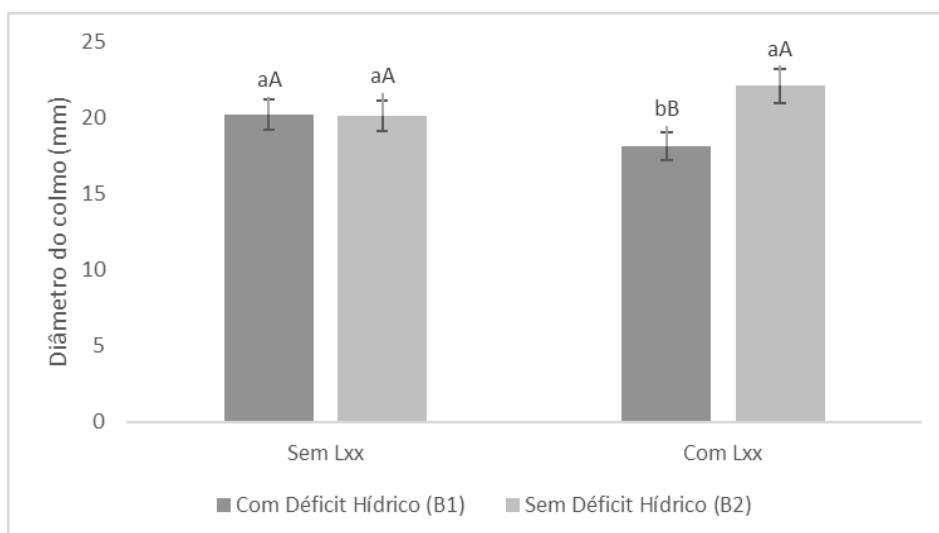


Imagem 2 - Diâmetro do colmo.

Nota: Letras minúsculas distintas na mesma coluna (comparando materiais) e letras maiúsculas distintas na mesma linha (comparando regimes hídricos) diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ($p < 0,05$).

A redução de 12,5% no diâmetro do material convencional em relação ao MPB sob déficit evidencia o sinergismo negativo entre Lxx e seca, agravando os danos ao crescimento secundário, onde do ponto de vista agrônômico, o uso de mudas pré-brotadas indexadas é uma estratégia fundamental para reduzir a vulnerabilidade da cultura a estresses combinados, uma vez que o diâmetro está

diretamente correlacionado com a produtividade de biomassa e de açúcares (Braga Júnior et al., 2023).

O manejo integrado, combinando qualidade do material propagativo com práticas adequadas de irrigação, é essencial para garantir a sustentabilidade produtiva. E a ausência de efeito dos atenuantes no diâmetro indica que, em condições de estresse severo, a prioridade deve ser a escolha de material sadio e o manejo hídrico, relegando os atenuantes a um papel complementar.

4.3 Biomassa seca

Houve efeito isolado do déficit hídrico ($p = 0,0004$), sem interações com atenuantes ou material propagativo, a MST reduziu 37,7% (de 0,175 para 0,109 g), com quedas de 36,6% na MSPA e 40,4% na MSR.

A redução proporcional indica que não houve alteração na alocação relativa de biomassa como apresentado na Tabela 2 a seguir:

Tabela 2 - Partição de biomassa em massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca da raiz (MSR) e massa seca total (MST) de plantas de cana-energia submetidas a níveis isolados de estresse hídrico.

Condição Hídrica (Fator B)	MSPA (g)	MSR (g)	MST (g)
Com Déficit Hídrico (B1)	0,078± 0,019b	0,031± 0,007b	0,109± 0,023b
Sem Déficit Hídrico (B2)	0,123± 0,022a	0,052± 0,011a	0,175± 0,031a

CV (%)	32,19%	29,40%	30,15%
--------	--------	--------	--------

Nota: Médias seguidas por letras distintas na mesma coluna indicam diferença significativa para o fator isolado pelo teste de Tukey a 5% de significância ($p < 0,05$). Valores expressos como Média $\pm$ Desvio Padrão.

A ausência de efeito dos atenuantes e do material propagativo sobre a biomassa contrasta com estudos em estresse moderado (Oliveira et al., 2021a; Teixeira et al., 2022), mas está alinhada com Raza et al. (2022), que apontam que em estresse combinado severo os efeitos na produtividade primária são menos passíveis de reversão. A perda de $\approx 37\%$ é consistente com projeções de Dias et al. (2021) e dados da CONAB (2024a,b) para os cenários de seca intensa.

Os resultados consolidam, portanto, o déficit hídrico como o principal fator limitante da produtividade primária, reduzindo a biomassa em 37,7% e reforçando que o manejo hídrico continua sendo a medida prioritária, independentemente da qualidade do material propagativo ou da aplicação de atenuantes.

A ausência de resposta da biomassa aos atenuantes, embora contrastante com alguns estudos, indica que, sob condições de estresse severo, as respostas bioquímicas de curto prazo (como redução de H_2O_2 e MDA) não se traduzem necessariamente em ganhos detectáveis de crescimento no período avaliado. Isso sugere que a irrigação adequada é insubstituível e deve ser priorizada, enquanto os atenuantes podem ser vistos como ferramentas complementares para mitigar danos oxidativos, mas não para reverter perdas de biomassa já estabelecidas.

Essa redução proporcional evidenciada entre parte aérea e raiz indica que não houve alteração na alocação de carbono, sugerindo que a planta manteve sua estratégia de partição mesmo sob estresse, o que pode ser interpretado como uma resposta conservativa que torna a cultura mais vulnerável a danos irreversíveis quando o estresse se prolonga.

4.4 Pigmentos fotossintéticos e degradação da clorofila

Na Tabela 3 a seguir, são apresentados os resultados dos teores de clorofilas, feofitina total e carotenoides.

Tabela 3 - Teores de clorofila *a*, clorofila *b*, clorofila total, feofitina total e carotenoides em folhas de cana-energia (VERTIX 12) em função de materiais propagativos, estresse hídrico e atenuantes.

Parâmetro / Tratamento (C1)	Silício (C1)	Extrato de Alga (C2)	Controle (C3)
Clorofila a			
Com Déficit Hídrico (B1)	0,0400 ± 0,0100 bA	0,0400 ± 0,0100bA	0,0483 ± 0,0075aA
Sem Déficit Hídrico (B2)	0,0867 ± 0,0115aA	0,0633 ± 0,0208aB	0,0600 ± 0,0100aB
Clorofila b			
Com Déficit Hídrico (B1)	0,0767 ± 0,0153	0,0800 ± 0,0265	0,0867 ± 0,0153
Sem Déficit Hídrico (B2)	0,1467 ± 0,0208	0,1133 ± 0,0379	0,1117 ± 0,0202
Média Geral Hídrica (Chl b)	B1: 0,0811b	—	B2: 0,1239a
Clorofila Total			
Com Déficit Hídrico (B1)	0,1167 ± 0,0252	0,1200 ± 0,0361	0,1317 ± 0,0236
Sem Déficit Hídrico (B2)	0,2333 ± 0,0321	0,1767 ± 0,0586	0,1767 ± 0,0252
Média Geral Hídrica (Chl Tot)	B1: 0,1228b	—	B2: 0,1956a
Feofitina Total (Desdobramento AB)	Mudas MPB (Sem Lxx)	Convencional (Com Lxx)	
Com Déficit Hídrico (B1)	2,88 ± 0,31bB	4,35 ± 0,42aA	

Sem Déficit Hídrico (B2)	2,61 ± 0,28aA	2,70 ± 0,22bA	
Carotenoides			
Com Déficit Hídrico (B1)	0,2300 ± 0,0265a	0,2467 ± 0,0208a	0,2300 ± 0,0200a
Sem Déficit Hídrico (B2)	0,2667 ± 0,0306a	0,2400 ± 0,0200a	0,2350 ± 0,0229a
CV (%)	Chl a = 23,19%	Chl b = 21,80%	Feof. T = 15,12%

Nota: Médias seguidas por letras minúsculas distintas na mesma coluna (efeito hídrico) e letras maiúsculas distintas na mesma linha (efeito de atenuantes ou do material propagativo) diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ($p < 0,05$). Valores expressos como Média e Desvio Padrão.

Clorofila a: houve interação significativa entre déficit hídrico e atenuantes ($B \times C$; $p = 0,0110$) e sob déficit, todos os tratamentos tiveram teores reduzidos para $\sim 0,040 \text{ mg g}^{-1} \text{ MF}$. Em irrigação plena, o silício (0,0867) superou o controle em +37% e o extrato de alga em +31% (Imagem 3).

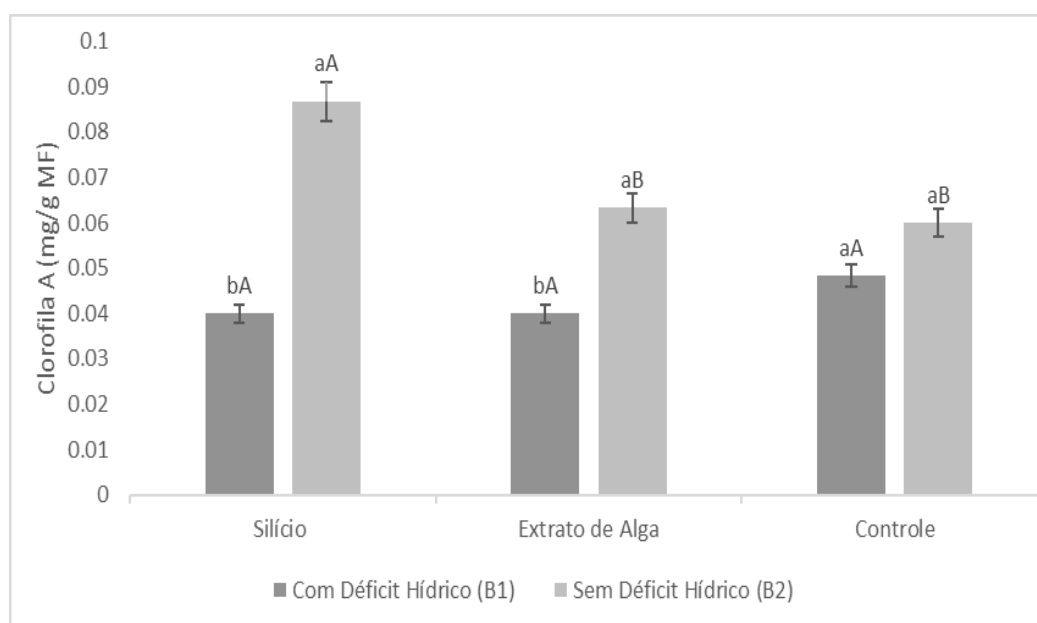


Imagem 3 – Clorofila a.

Nota: Médias seguidas por letras minúsculas distintas na mesma coluna (efeito hídrico) e letras maiúsculas distintas na mesma linha (efeito de atenuantes) diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Clorofila b e total: houve efeito isolado do déficit hídrico, com reduções de 34,5% (de 0,1239 para 0,0811) e 37,2% (de 0,1956 para 0,1228), respectivamente.

A degradação das clorofilas sob déficit confirma dano oxidativo ao aparato fotossintético, sendo a a clorofila b mais suscetível, conforme Wang, Zhibo, et al. (2018).

O efeito do silício sobre a clorofila a apenas em irrigação plena indica que esse elemento atua como protetor do fotossistema quando não há estresse severo, possivelmente pela deposição de sílica (Teixeira et al., 2022), mas sob déficit seu benefício é anulado, divergindo de estudos com seca moderada (Verma et al., 2021), provavelmente devido à severidade do estresse e à via de aplicação.

Feofitina total: ocorreu uma interação significativa entre material propagativo e regime hídrico ($A \times B$; $p = 0,0009$), e sob déficit, o material convencional (4,35) foi 51% superior ao MPB (2,88). Em irrigação plena, os valores foram similares (Imagem 4).

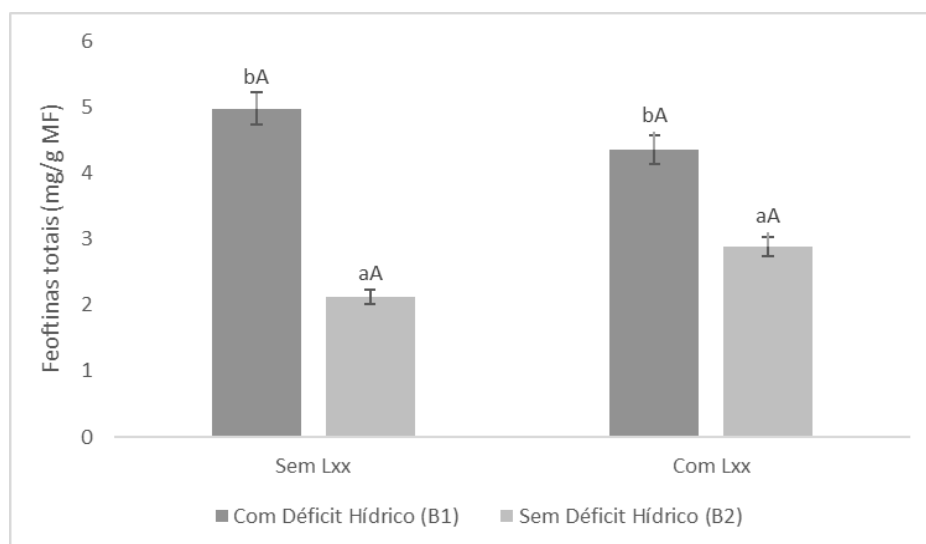


Imagem 4 – Feofitina total.

Médias seguidas por letras minúsculas distintas na mesma coluna (efeito hídrico) e letras maiúsculas distintas na mesma linha (efeito do material propagativo) diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ($p < 0,05$).

O aumento de 51% na feofitina do material convencional sob déficit é um achado relevante, pois a feofitina, que é um produto da degradação oxidativa da clorofila, é marcador de dano ao fotossistema (Raza et al., 2022). Esse incremento revela um sinergismo negativo claro entre a infecção por Lxx e a seca, efeito não observado em irrigação plena, demonstrando que a qualidade do material propagativo influencia a estabilidade dos pigmentos apenas quando combinada com estresse abiótico.

Carotenoides: sem diferenças significativas ($p > 0,05$) (Imagem 5), e ao estarem estáveis reforçam seu papel como última linha de defesa contra a foto-oxidação, conforme Rao et al. (2025) e Santaniello, Antonietta, et al (2017).

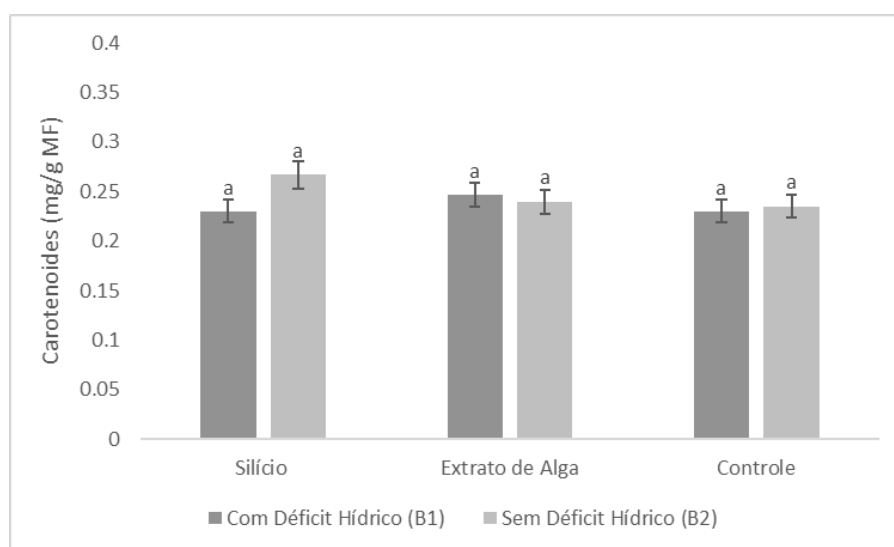


Imagem 5 – Carotenoides

Médias seguidas por letras minúsculas distintas na mesma coluna (comparando regimes hídricos) e letras maiúsculas distintas na mesma linha (comparando atenuantes) diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

A degradação das clorofilas sob estresse hídrico sugere dano oxidativo ao aparato fotossintético, especialmente em material contaminado com Lxx. Este resultado, combinado com a estabilidade dos carotenoides, indica que o sistema

de proteção fotoquímica da planta é comprometido seletivamente, com as clorofilas sendo mais vulneráveis que os carotenoides.

O efeito benéfico do silício em condições de irrigação plena, mas não sob déficit, sugere que a aplicação de silício deve ser planejada como medida preventiva, em associação com irrigação adequada, e não como estratégia isolada para mitigar estresse severo, pois a interação Lxx vs seca evidenciada pela feofitina reforça a recomendação do uso de mudas pré-brotadas indexadas como prática prioritária, uma vez que a associação entre patógeno vascular e déficit hídrico intensifica a degradação do aparato fotossintético de forma que nenhum atenuante foi capaz de reverter completamente.

Do ponto de vista prático, a avaliação da feofitina pode ser um indicador sensível da interação entre sanidade do material e estresse hídrico, auxiliando na tomada de decisão sobre o manejo integrado.

4.5 Estresse oxidativo (H_2O_2 e MDA) e ajuste osmótico (prolina)

Tabela 4 - Concentração foliar de H_2O_2 ($\mu\text{mol g}^{-1}$ MF), MDA (nmol g^{-1} MF) e teores de Prolina ($\mu\text{mol g}^{-1}$ MF) sob interações de estresses e substâncias mitigadoras. (conforme original).

Parâmetro/condição	Silício (C1)	Extrato de Alga (C2)	Controle (C3)
Peróxido de Hidrogênio (H₂O₂)			
Mudas MPB (Sem Lxx)			
Com Déficit Hídrico (B1)	78,15 ± 9,20aA	84,30 ± 11,40aA	62,15 ± 5,30bB
Sem Déficit Hídrico (B2)	60,22 ± 6,10bA	59,45 ± 7,10bA	57,12 ± 4,90aA
Convencional (Com Lxx)			
Com Déficit Hídrico (B1)	124,30 ± 15,20aA	54,18 ± 6,15bB	112,40 ± 12,10aA

Sem Déficit Hídrico (B2)	66,15 ± 7,30bA	51,12 ± 4,90bA	69,33 ± 6,80bA
Malondialdeído (MDA)			
Mudas MPB (Sem Lxx)			
Com Déficit Hídrico (B1)	69,45 ± 8,50aA	83,43 ± 12,10aA	58,34 ± 9,15bB
Sem Déficit Hídrico (B2)	76,12 ± 9,30aA	64,35 ± 7,80bA	63,12 ± 6,40bA
Convencional (Com Lxx)			
Com Déficit Hídrico (B1)	81,30 ± 11,20aA	40,12 ± 5,30bB	60,22 ± 7,90aAB
Sem Déficit Hídrico (B2)	60,65 ± 7,10bA	48,84 ± 6,10aA	58,44 ± 6,80aA
Prolina			
Com Déficit Hídrico (B1)	480,12 ± 35,41aA	398,54 ± 29,10aB	479,32 ± 41,20aA
Sem Déficit Hídrico (B2)	210,45 ± 18,22bA	245,12 ± 22,43bA	230,88 ± 19,55bA
CV (%)	H ₂ O ₂ = 18,94%	MDA = 17,21%	Prolina = 27,04%

Nota: Médias seguidas por letras minúsculas distintas na mesma coluna (comparando regimes hídricos) e letras maiúsculas distintas na mesma linha (comparando atenuantes) diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ($p < 0,05$) dentro de cada respectiva subdivisão. Valores expressos como Média-Desvio Padrão.

H₂O₂ e MDA: ocorreu uma interação tripla significativa (A×B×C; $p = 0,0303$ para H₂O₂ e $p = 0,0287$ para MDA), onde no material convencional sob déficit, o extrato de alga reduziu H₂O₂ em 56,4% vs. silício e 51,8% vs. controle; para MDA, as reduções foram de 50,7% vs. silício e 33,4% vs. controle. Em MPB sob déficit, o controle teve os menores teores, indicando que o extrato de alga não foi eficaz nesse background, conforme apresentado nos Imagens 6, 7 e 8

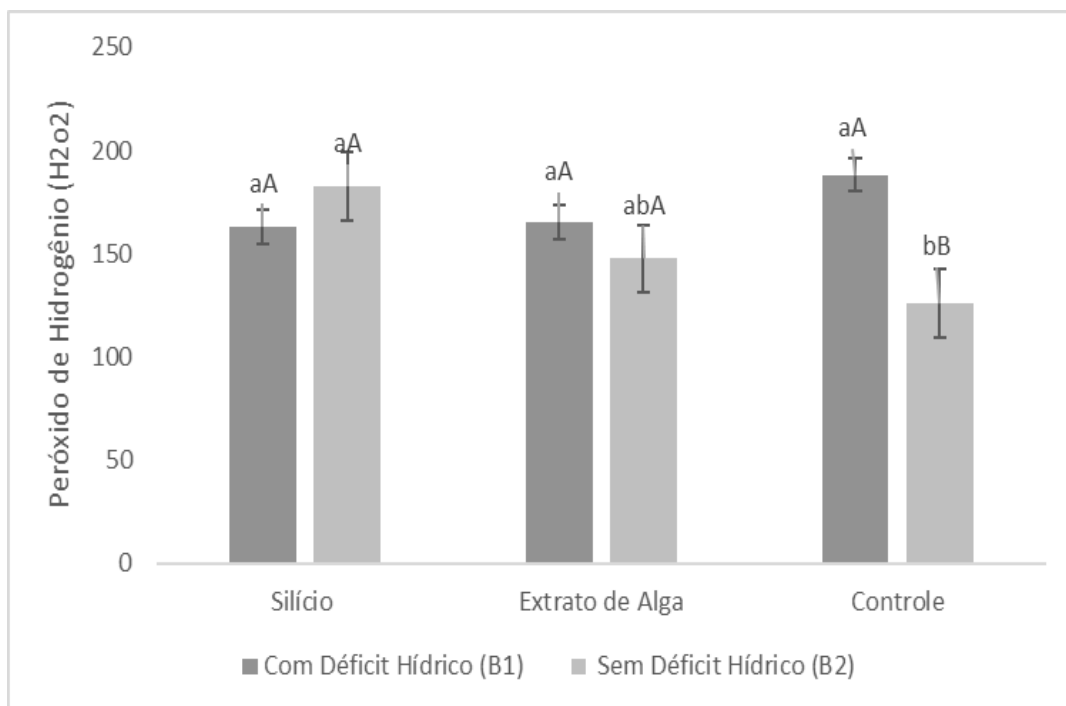


Imagem 6 – Peróxido de Hidrogênio (H₂O₂).

Nota: Médias seguidas por letras minúsculas distintas na mesma coluna (comparando regimes hídricos) e letras maiúsculas distintas na mesma linha (comparando atenuantes) diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

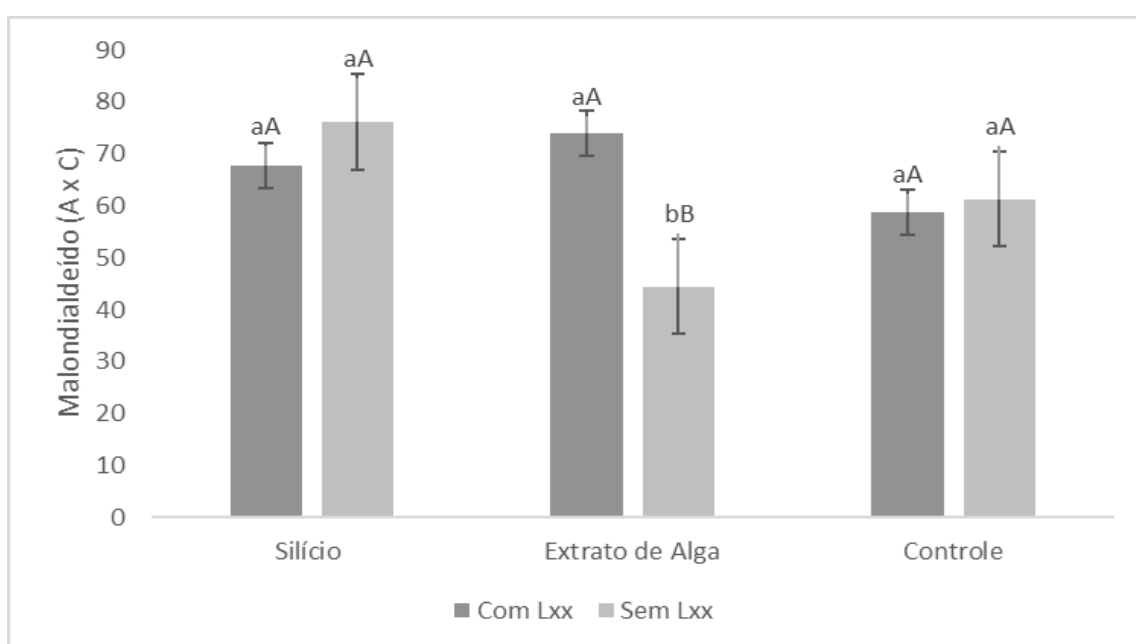


Imagem 7 – MDA interação AxC

Nota: Médias seguidas por letras minúsculas distintas na mesma coluna (comparando regimes hídricos) e letras maiúsculas distintas na mesma linha (comparando atenuantes) diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

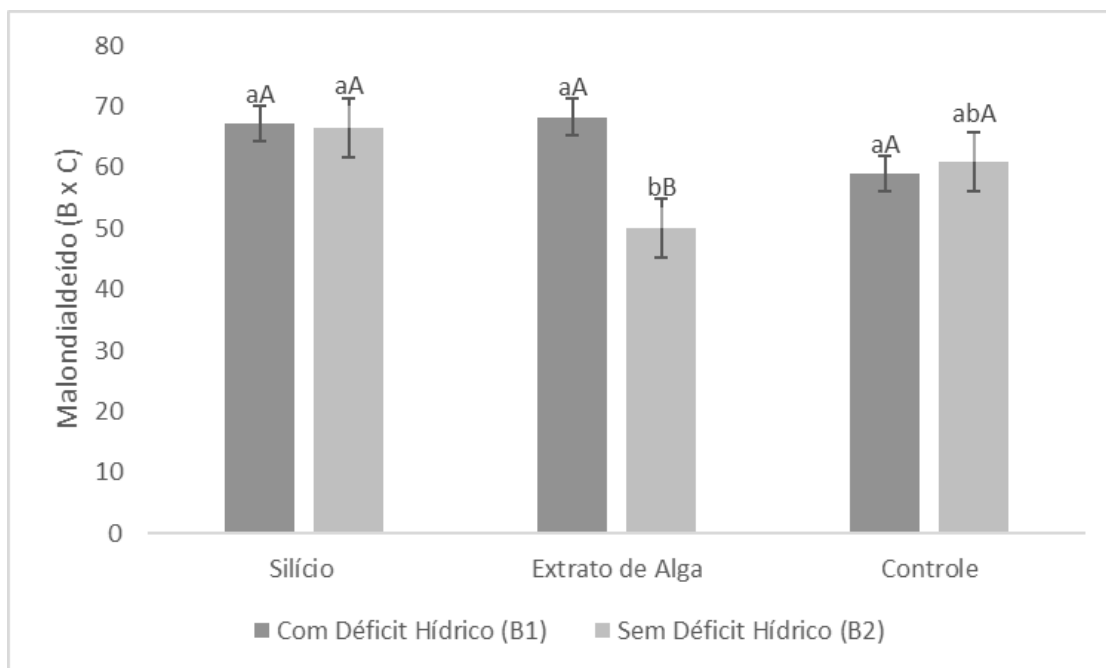


Imagem 8 – MDA interação BxC

Nota: Médias seguidas por letras minúsculas distintas na mesma coluna (comparando regimes hídricos) e letras maiúsculas distintas na mesma linha (comparando atenuantes) diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

O aumento de H_2O_2 e MDA sob déficit confirma estresse oxidativo e peroxidação lipídica, conforme Alkahtani, Muneera D F, et al (2021), ocorrendo eficácia do extrato de alga apenas no material convencional sob déficit sugere que a presença da Lxx pode ter induzido um estado de *priming* que potencializou a ação dos compostos bioativos do extrato (*Ascophyllum nodosum*), descritos por Sharma et al. (2014) e Battacharyya et al. (2015) como moduladores do sistema antioxidante. Em plantas sadias (MPB), esse efeito não ocorreu, indicando dependência do background biótico.

O silício, ao contrário do esperado, não reduziu os marcadores oxidativos e, em alguns casos, apresentou os maiores valores de MDA (81,30). Esse comportamento encontra respaldo em Checchio et al. (2021) e Oliveira et al. (2021a), que mostraram que o silício pode atuar como eliciador de ERO em estresse severo, exacerbando a peroxidação lipídica.

Teixeira et al. (2022) também relataram perda de eficácia sob seca associada a patógenos, situação que diverge de estudos com estresse moderado (Verma et al., 2021) e indica que o silício deve ser aplicado de forma preventiva e em condições de estresse moderado, não como medida curativa em estresse combinado severo.

Prolina: houve interação B×C ($p < 0,0001$, onde ao ser mantido sob déficit, ocorreu um acúmulo foi 100-130% superior à irrigação plena. Dentro do déficit, o extrato de alga (398,54) foi 17% menor que o silício (480,12) e o controle (479,32) (Imagem 9).

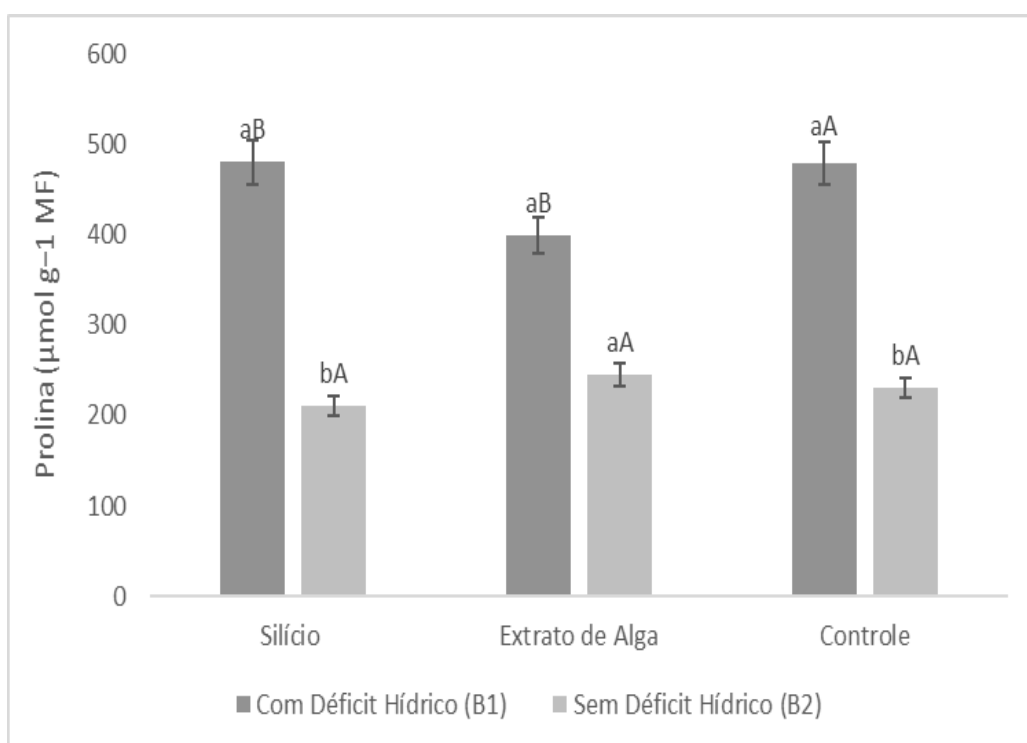


Imagem 9 – Prolina.

Médias seguidas por letras minúsculas distintas na mesma coluna (comparando regimes hídricos) e letras maiúsculas distintas na mesma linha (comparando atenuantes) diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A redução da prolina no extrato de alga sob déficit (–17%) corrobora a interpretação de que esse tratamento promoveu um estado de menor estresse percebido, dispensando o alto acúmulo do osmólito, alinhando-se com PARVEEN, A., et al (2019), que concluíram que plantas com melhor neutralização de ERO podem acumular menos prolina. A conexão entre a redução de MDA e a menor prolina no mesmo tratamento reforça a consistência dos dados.

Portanto, o acúmulo de prolina sob déficit hídrico confirma seu papel como osmoprotetor e a menor concentração no tratamento com extrato de alga sugere que este atenuante reduziu o estresse percebido pela planta, promovendo maior ajuste osmótico e proteção contra danos oxidativos, especialmente em plantas com Lxx.

Este resultado indica que o extrato de alga pode ser uma ferramenta complementar eficaz para mitigar estresses em áreas com histórico de raquitismo da soqueira, mas sua eficácia depende do contexto biótico. A ineficiência do silício em condições de estresse severo sugere que a aplicação deste atenuante deve ser repensada em cenários de estresse combinado, sendo mais adequada para condições de estresse moderado ou como medida preventiva.

A não atenuação generalizada do estresse oxidativo, com a ressalva de que o extrato de alga foi eficaz em condição específica (convencional sob déficit),

indica que, de modo geral, os atenuantes não reverteram completamente os danos oxidativos em todos os cenários, especialmente o silício.

Reforçando que as estratégias de mitigação devem ser integradas e não isoladas, combinando qualidade do material propagativo, manejo hídrico adequado e aplicação criteriosa de atenuantes, com ênfase na prevenção em vez da correção de danos já estabelecidos, portanto a dependência da eficácia do extrato de alga em relação à presença da Lxx sugere que a decisão de uso deve considerar o histórico sanitário da área, e futuros estudos devem investigar os mecanismos moleculares envolvidos nessa interação.

5. CONCLUSÃO

O déficit hídrico foi o principal fator limitante do desempenho fisiológico e produtivo da cana-energia, promovendo as reduções mais expressivas observadas: queda de 37,7% na massa seca total, degradação de 34,5% da clorofila *a+b* e de 37,2% da clorofila total, além do aumento acentuado dos marcadores de estresse oxidativo e do acúmulo de prolina.

A qualidade do material propagativo influenciou a resposta da planta ao estresse de forma dependente das condições ambientais, confirmando parcialmente a hipótese inicial. E os efeitos negativos da infecção por *Leifsonia xyli subsp. xyli* manifestaram-se mais acentuadamente quando associados ao déficit hídrico, evidenciados pela redução de 12,5% no diâmetro do colmo e pelo aumento de 51% na feofitina total no material convencional sob seca, indicando que o sinergismo entre estresse biótico e abiótico intensifica os danos fisiológicos e bioquímicos.

Os agentes atenuantes apresentaram eficácia condicional e dependente do contexto: o silício demonstrou efeito benéfico sobre a clorofila *a* apenas em condições de irrigação plena (+37%), sendo sua eficácia anulada sob déficit hídrico severo; já o extrato de alga mostrou-se promissor na redução dos marcadores de estresse oxidativo e no ajuste osmótico, especialmente em plantas infectadas por Lxx e submetidas ao déficit hídrico, com reduções de 56,4% no H_2O_2 , 50,7% no MDA e 17% na prolina.

Contudo, sua eficácia não foi observada em plantas sadias, indicando dependência do background biótico, onde as respostas bioquímicas de curto prazo não se traduziram em ganhos detectáveis de biomassa no período avaliado, sugerindo que os efeitos na produtividade primária são menos passíveis de reversão.

Recomenda-se, portanto, priorizar o uso de mudas pré-brotadas indexadas como estratégia fundamental para reduzir a vulnerabilidade da cultura a estresses combinados, adotar o extrato de alga como ferramenta complementar em áreas com histórico de infecção por Lxx, aplicar o silício de forma preventiva e em condições de estresse moderado, e integrar essas práticas ao manejo hídrico adequado, com a irrigação como medida prioritária.

Futuros estudos devem investigar os mecanismos enzimáticos e moleculares subjacentes às respostas observadas, bem como validar os resultados em condições de campo.

Por fim, este estudo contribui para o entendimento das interações entre sanidade vegetal, estresses ambientais e mecanismos de adaptação da cana-de-açúcar, fornecendo subsídios para o aprimoramento das práticas de manejo e para a tomada de decisão no setor sucroenergético.

6. REFERÊNCIAS

ALEXIEVA, V.; SERGIEV, I.; MAPELLI, S.; KARANOV, E. The effect of drought and ultraviolet radiation on growth and stress markers in pea and wheat. *Plant, Cell and Environment*, v. 24, n. 12, p. 1337–1344, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2001.00778.x>.

Alkahtani, M. D. F., Hafez, Y., Attia, K., Rashwan, E., Husnain, L. A., Algwaiz, H. I. M., & Abdelaal, K. (2021). Evaluation of Silicon and Proline Application on the Oxidative Machinery in Drought-Stressed Sugar Beet. *Antioxidants*, 10. <https://doi.org/10.3390/antiox10030398>

BATES, L. S.; WALDREN, R. P.; TEARE, I. D. Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil*, v. 39, n. 1, p. 205–207, 1973. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00018060>.

BRAGA JÚNIOR, R. L. C.; LANDELL, M. G. A.; XAVIER, M. A. Censo varietal IAC de cana-de-açúcar no Brasil - Safra 2022/23. Campinas: Instituto Agrônômico, 2023.

CHECCHIO, M. V.; GOMES, F. P.; PRADO, R. M.; GRATÃO, P. L. Silicon (Si) alleviates the negative effects of iron (Fe) deficiency in sugarcane by modulating physiological and biochemical traits. *Scientific Reports*, v. 11, p. 21917, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-01495-0>.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). Acompanhamento da safra brasileira: cana-de-açúcar. Brasília, 2024a.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). Série histórica da produção agrícola: cana-de-açúcar. Brasília, 2024b.

DIAS, H. B. SENTELHAS, P. C.; INMAN-BAMBER, G.; EVERINGHAM, Y. Sugarcane yield future scenarios in Brazil as projected by the APSIM-Sugar model. *Industrial Crops and Products*, v. 171, p. 113918, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113918>.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). FAOSTAT database. Roma, 2023.

Gelza Carliane Marques, et al. "Action of silicon on the activity of antioxidant enzymes and on physiological mechanisms mitigates water deficit in sugarcane and energy cane plants." *Scientific Reports*, vol. 12, 2022, <https://doi.org/10.1038/s41598-022-21680-9>.

HOLM-HANSEN, O.; RIEMANN, B. Chlorophyll a determination: improvements in methodology. *Oikos*, v. 30, n. 3, p. 438–447, 1978. DOI: <https://doi.org/10.2307/3543338>.

INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Climate Change 2023: Synthesis Report. Geneva, 2023.

LANDELL, M. G. A.; BRESSIANI, J. A. CAMPANA, M. P. Advances in sugarcane propagation systems in Brazil. Campinas: IAC, 2021.

LICHTENTHALER, H. K. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods in Enzymology*, v. 148, p. 350–382, 1987. DOI: [https://doi.org/10.1016/0076-6879\(87\)48036-1](https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1).

MANIMEKALAI, R.; SELVI, A.; NARAYANAN, J.; VANNISH, R.; SHALINI, R.; GAYATHRI, S.; RABISHA, V. P. Comparative physiological and transcriptome analysis in cultivated and wild sugarcane species in response to hydrogen peroxide-induced oxidative stress. *BMC Genomics*, v. 24, n. 155, 2023. DOI: 10.1186/s12864-023-09218-3.

MORAIS, M. B. CÂMARA, T. R.; ULISSES, C.; CARVALHO FILHO, J. L. S.; WILLADINO, L. Multiple stresses on the oxidative metabolism of sugarcane varieties. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 48, n. 4, e20141487, 2018. DOI: 10.1590/0103-8478cr20141487.

NATURE INDEX. Antioxidant mechanisms in plant stress responses. [S. l.], 2025. Disponível em: <https://www.nature.com/nature-index/topics/l4/antioxidant-mechanisms-in-plant-stress-responses>. Acesso em: 18 maio 2026.

OLIVEIRA, K. S.; PRADO, R. M.; CHECCHIO, M. V.; GRATÃO, P. L. Silicon via nutrient solution modulates deficient and sufficient manganese sugar and energy cane antioxidant systems. *Scientific Reports*, v. 11, p. 16910, 2021a. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-96415-3>.

Otto, R., Machado, B. A., Da Silva, A. C. M., De Castro, S. G. Q., & Lisboa, I. P. (2022). Sugarcane pre-sprouted seedlings: A novel method for sugarcane establishment. *Field Crops Research*. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108336>

PALMA, M. S. G. Estresse oxidativo em raízes de plantas jovens de cana-de-açúcar sob toxidez de alumínio e com suplementação de silício. 2021. 51 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciências Biológicas) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), Câmpus de Jaboticabal, Jaboticabal, 2021.

PARVEEN, A., LIU, W., HUSSAIN, S., ASGHAR, J., PERVEEN, S., & XIONG, Y. (2019). Silicon Priming Regulates Morpho-Physiological Growth and Oxidative Metabolism in Maize under Drought Stress. *Plants*, 8. <https://doi.org/10.3390/plants8100431>

PAULA, R. J. Respostas antioxidantes de cultivares de cana-de-açúcar tolerante à seca e a herbicidas devido ao déficit hídrico. 2019. 68 f. Tese (Doutorado em Agronomia – Produção Vegetal) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), Câmpus de Jaboticabal, Jaboticabal, 2019.

PEREIRA, J. F. Avaliação econômica de calo de cana-de-açúcar induzido a partir do meio de Murashige & Skoog com nanopartículas de prata. 2025. 82 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Instituto de Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2025.

PERTICARRARI, A. L. P. M. Experimentação Agrícola: Aula 7 – Teste de Tukey, Duncan e Scheffé. Jaboticabal: Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, 2025. Material didático da disciplina de Experimentação Agrícola.

RAO, M. J.; DUAN, M.; ZHOU, C.; JIAO, J.; CHENG, P.; YANG, L.; WEI, W.; SHEN, Q.; JI, P.; YANG, Y.; CONTEH, O.; YAN, D.; YUAN, H.; RAUF, A.; AI, J.; ZHENG, B. Antioxidant defense system in plants: reactive oxygen species production, signaling, and scavenging during abiotic stress-induced oxidative damage. *Horticulturae*, v. 11, n. 5, p. 477, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/horticulturae11050477>.

RAZA, A.; CHARAGUNDLA, Y.; PRASAD, P. V. V. Combined stress responses in plants. *Plants*, v. 11, 2022.

Reis, V. U. V., Penido, A. C., Carvalho, E. R., Rocha, D. K., Reis, L. V., & Semolini, P. H. Z. (2022). Vigor of maize seeds and its effects on plant stand establishment, crop development and grain yield. *Journal of Seed Science*. <https://doi.org/10.1590/2317-1545v44257527>

SILVA, A. M. S.; OLIVEIRA, E. C. A.; WILLADINO, L. G.; FREIRE, F. J.; ROCHA, A. T. Corrective phosphate application as a practice for reducing oxidative stress and increasing productivity in sugarcane. *Revista Ciência Agronômica*, Fortaleza, v. 50, n. 2, p. 188-196, 2019. DOI: 10.5935/1806-6690.20190022.

SILVA, L. F.; BARRETO, K. F. M.; SILVA, H. C.; SOUZA, I. D.; MENESES, C. H. S. G.; UCHOA, A. F.; SCORTECCI, K. C. Insights of cellular and molecular changes in sugarcane response to oxidative signaling. *BMC Plant Biology*, v. 25, n. 54, 2025. DOI: 10.1186/s12870-024-06036-x.

SOUZA, L. M.; SILVA, M. M. A.; HERCULANO, L.; ULISSES, C.; CAMARA, T. R. Meta-topolin: an alternative for the prevention of oxidative stress in sugarcane micropropagation. *Hoehnea*, v. 46, n. 3, e1072018, 2019. DOI: 10.1590/2236-8906-107/2018.

TEIXEIRA, G. C. M.; PRADO, R. M.; ROCHA, A. M.; GRATÃO, P. L. Action of silicon on the activity of antioxidant enzymes and on physiological mechanisms

mitigates water deficit in sugarcane and energy cane plants. *Scientific Reports*, v. 12, p. 17435, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-22409-4>.

TOKESHI, H.; RAGO, A. M. Métodos sorológicos para detecção de *Leifsonia xyli* subsp. *xyliem* cana-de-açúcar. *Summa Phytopathologica*, Botucatu, v. 32, n. 1, p. 5-10, 2006.

VERMA, K. K.; SONG, X.-P.; ZENG, Y.; GUO, D.-J.; SINGH, M.; RAJPUT, V. D.; MALVIYA, M. K.; WEI, K.-J.; SHARMA, A.; LI, D.-P.; CHEN, G.-L.; LI, Y.-R. Foliar application of silicon boosts growth, photosynthetic leaf gas exchange, antioxidative response and resistance to limited water irrigation in sugarcane (*Saccharum officinarum* L.). *Plant Physiology and Biochemistry*, v. 166, p. 582–592, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.06.032>.