

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

Bioestimulante à base de alga *Ascophyllum nodosum* como indutor de tolerância ao déficit hídrico em plantas de soja e seu efeito na qualidade fisiológica das sementes

Lucas Rodrigues de Souza
Magister Scientiae

VIÇOSA - MINAS GERAIS
2026

LUCAS RODRIGUES DE SOUZA

Bioestimulante à base de alga *Ascophyllum nodosum* como indutor de tolerância ao déficit hídrico em plantas de soja e seu efeito na qualidade fisiológica das sementes

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientadora: Denise C. F. dos S. Dias

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2026**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

S729b
2026

Souza, Lucas Rodrigues de, 1994-

Bioestimulante à base de alga *Ascophyllum nodosum* como indutor de tolerância ao déficit hídrico em plantas de soja e seu efeito no potencial fisiológico das sementes / Lucas Rodrigues de Souza. – Viçosa, MG, 2026.

1 dissertação eletrônica (52 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Denise Cunha Fernandes dos Santos Dias.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Agronomia, 2026.

Referências bibliográficas: f. 47-52.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2026.408>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Soja - Resistência à seca. 2. Soja - Semente - Qualidade. 3. Soja - Fisiologia - Efeito dos compostos bioativos. 4. Algas - Cultura e meios de cultura. I. Dias, Denise Cunha Fernandes dos Santos, 1958-. II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Agronomia. Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia. III. Título.

CDD 22. ed. 583.741754

LUCAS RODRIGUES DE SOUZA

Bioestimulante à base de alga *Ascophyllum nodosum* como indutor de tolerância ao déficit hídrico em plantas de soja e seu efeito na qualidade fisiológica das sementes

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 26 de fevereiro de 2026.

Assentimento:

Lucas Rodrigues de Souza
Autor

Denise Cunha Fernandes dos Santos Dias
Orientadora

Essa dissertação foi assinada digitalmente pelo autor em 08/07/2026 às 18:01:49 e pela orientadora em 09/07/2026 às 10:06:48. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **HS8K.SHZC.JOCO** e clique no botão 'Validar documento'.

A Deus, por guiar meus passos e me conceder força e perseverança para chegar até aqui.

À minha família e amigos que são meu alicerce, por todo o amor, apoio e incentivo ao longo desta caminhada.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ser presença constante em minha vida, concedendo força, sabedoria, serenidade e perseverança ao longo de toda essa trajetória. Em cada desafio enfrentado, foi nele que encontrei sustentação para seguir adiante e concluir mais esta etapa. À minha família, pelo amor incondicional, apoio contínuo, incentivo e compreensão em todos os momentos. À base familiar foi essencial para minha formação pessoal e profissional, sendo fonte de motivação e segurança durante todo o percurso acadêmico. À professora Denise Cunha Fernandes dos Santos Dias, minha orientadora, expressei minha profunda gratidão pela confiança, dedicação, paciência e pelos valiosos ensinamentos compartilhados ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Sua orientação criteriosa, aliada ao compromisso com a ciência e à sensibilidade humana, foi determinante para meu crescimento acadêmico e profissional. Ao Dr. Thiago Barbosa Batista, meu coorientador, agradeço a parceria, disponibilidade, contribuições científicas e apoio em todas as etapas da pesquisa, sempre com olhar crítico e construtivo, fundamentais para o aprimoramento deste estudo. À Dra. Genaina A. de Souza, pelas contribuições, apoio e colaboração ao longo do trabalho, que foram importantes para a condução das atividades e para a consolidação dos resultados. Ao meu namorado Jean, pelo carinho, companheirismo, incentivo constante e compreensão nos momentos de maior dedicação ao trabalho, sendo presença fundamental para que eu mantivesse o equilíbrio emocional e a motivação ao longo dessa caminhada. Ao GSEM – Grupo de Estudos em Sementes, pelo ambiente de aprendizado, troca de conhecimentos, apoio técnico e científico, além das experiências compartilhadas, que contribuíram de forma significativa para minha formação e para o desenvolvimento desta pesquisa. Ao João Vitor, estagiário, pela dedicação, responsabilidade e auxílio nas atividades experimentais, e ao Júlio César, mestrando, pela parceria, discussões técnicas e colaboração durante a execução do experimento. Ao Gabriel Lisboa, amigo, pelo apoio, incentivo e amizade, que tornaram essa jornada mais leve e significativa. Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho e para minha formação acadêmica e pessoal. A cada um, minha sincera gratidão. Este trabalho foi realizado com o apoio das seguintes agências de pesquisa brasileiras: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

RESUMO

SOUZA, Lucas Rodrigues de, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2026. **Bioestimulante à base de alga *Ascophyllum nodosum* como indutor de tolerância ao déficit hídrico em plantas de soja e seu efeito na qualidade fisiológica das sementes.** Orientadora: Denise Cunha Fernandes dos Santos Dias.

O uso de bioestimulantes, especialmente aqueles à base de extratos de algas marinhas, tem se destacado como uma estratégia promissora para mitigar os efeitos de estresses abióticos, contribuindo para a manutenção do desempenho fisiológico das plantas sob condições adversas. Objetivou-se avaliar os efeitos da aplicação foliar de um bioestimulante à base de *Ascophyllum nodosum* na indução da tolerância ao déficit hídrico em plantas de soja e seus reflexos sobre a qualidade fisiológica das sementes produzidas. O experimento foi conduzido em casa de vegetação do Departamento de Agronomia da Universidade Federal de Viçosa, durante a safra 2024/2025. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, em esquema fatorial 2×3 , constituído por dois cultivares de soja (CV1: 55I57RSF IPRO e CV2: 56IX58RSF I2X) e três condições hídricas: capacidade de campo (CC), com irrigação para manutenção da umidade do solo próxima à capacidade de campo até o estágio R7; déficit hídrico (DH) - solo mantido a 40% da capacidade de campo (CV1) e 50% da capacidade de campo (CV2) partir do estágio R5 até R7; e déficit hídrico associado à aplicação foliar de bioestimulante à base de *Ascophyllum nodosum* (DH+BIO) nos estádios R2, R4 e R5.3. As sementes foram colhidas no estágio R8 e avaliadas quanto à qualidade fisiológica e características bioquímicas, sendo também determinados parâmetros fisiológicos e bioquímicos das plantas-mãe. O déficit hídrico reduziu o potencial hídrico foliar, alterou a atividade das enzimas antioxidantes, comprometeu o desempenho fisiológico das plantas e diminuiu a qualidade fisiológica das sementes, com redução do vigor e do crescimento de plântulas. A aplicação do bioestimulante atenuou parte dos efeitos do estresse hídrico, favorecendo a manutenção do estado hídrico das plantas, modulando a atividade das enzimas antioxidantes e preservando a qualidade fisiológica das sementes produzidas. Além disso, foram observadas diferenças entre os cultivares quanto à intensidade das respostas fisiológicas e bioquímicas ao déficit hídrico e ao bioestimulante, evidenciando a influência do genótipo na tolerância ao estresse. Conclui-se que a aplicação foliar de *Ascophyllum nodosum* constitui uma estratégia eficiente para reduzir os efeitos do déficit hídrico na cultura da soja, contribuindo para a manutenção do desempenho fisiológico das plantas e para a produção de sementes de maior qualidade fisiológica.

Palavras-chave: Glycine max ; estresse hídrico; bioestimulante ; vigor de sementes ; sistema antioxidante

ABSTRACT

SOUZA, Lucas Rodrigues de, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2026. **Biostimulant based on the seaweed *Ascophyllum nodosum* as an inducer of tolerance to water deficit in soybean plants and its effect on the physiological potential of seeds.** Adviser: Denise Cunha Fernandes dos Santos Dias.

The use of biostimulants, particularly those derived from seaweed extracts, has emerged as a promising strategy to mitigate the adverse effects of abiotic stresses by maintaining plant physiological performance under unfavorable environmental conditions. This study aimed to evaluate the effects of foliar application of an *Ascophyllum nodosum*-based biostimulant on the induction of drought tolerance in soybean plants and its subsequent effects on the physiological quality of the produced seeds. The experiment was conducted in a greenhouse at the Department of Agronomy, Federal University of Viçosa, during the 2024/2025 growing season. A completely randomized design was adopted in a 2×3 factorial arrangement, consisting of two soybean cultivars (CV1: 55I57RSF IPRO and CV2: 56IX58RSF I2X) and three water regimes: field capacity (FC), with irrigation maintained close to field capacity until the R7 growth stage; water deficit (WD) soil maintained at 40% of field capacity (CV1) and 50% of field capacity (CV2) from stage R5 to R7; and water deficit associated with foliar application of *Ascophyllum nodosum*-based biostimulant (WD+BIO) at the R2, R4 and R5.3 stages. . Seeds were harvested at the R8 stage and evaluated for physiological quality and biochemical characteristics. In addition, physiological and biochemical were also assessed in the mother plants. Drought stress reduced leaf water potential, altered the activity of antioxidant enzymes, impaired plant physiological performance, and decreased seed physiological quality by reducing seed vigor and seedling growth. The application of the seaweed-based biostimulant partially alleviated the adverse effects of drought stress by improving plant water status, modulating antioxidant enzyme activity, and preserving the physiological quality of the produced seeds. Furthermore, the cultivars differed in the magnitude of their physiological and biochemical responses to drought stress and biostimulant application, highlighting the influence of genotype on stress tolerance. It is concluded that foliar application of *Ascophyllum nodosum* represents an effective strategy for mitigating the effects of drought stress in soybean, contributing to the maintenance of plant physiological performance and the production of seeds with superior physiological quality.

Keywords: Glycine max ; water stress; biostimulantseed ; seed vigor ; antioxidant system

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1.** Ilustrações das principais etapas da condução do experimento em casa de vegetação. Emergência das plântulas após a semeadura (A); manutenção de duas plantas por vaso após o desbaste (B); plantas em diferentes fases de desenvolvimento, com os vasos distribuídos nas bancadas (C, D e E); e aspecto das plantas no estágio R8 (F).....22
- Figura 2.** Potencial hídrico foliar de cultivares de soja submetidas aos tratamentos CC (capacidade de campo), DH (déficit hídrico) e DH + BIO (déficit hídrico + indutor de resistência à base de algas). Barras representam a média $\pm$ erro-padrão. Letras minúsculas iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$), comparando os tratamentos dentro de cada cultivar. Letras maiúsculas iguais não diferem entre si ($p < 0,05$), comparando as cultivares dentro de cada tratamento.....31
- Figura 3.** Atividade das enzimas superóxido dismutase (SOD; A), catalase (CAT; B) e peroxidase (POX; C) em folhas de soja provenientes de plantas submetidas aos tratamentos CC (capacidade de campo), DH (déficit hídrico) e DH+BIO (déficit hídrico + indutor de resistência à base de algas). Letras minúsculas iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$), comparando os tratamentos dentro de cada cultivar. Letras maiúsculas iguais não diferem entre si ($p < 0,05$), comparando as cultivares dentro de cada tratamento. As barras representam a média $\pm$ erro-padrão.....32
- Figura 4.** Peso de mil sementes (g) de soja obtidas de plantas submetidas aos tratamentos CC, DH e DH+BIO, cultivares CV1 e CV2. Letras minúsculas iguais não diferem pelo teste de Tukey ($p < 0,05$) e comparam tratamentos dentro de cada cultivar. Letras maiúsculas iguais não diferem pelo teste F ($p < 0,05$) e comparam cultivares dentro de cada tratamento.....36
- Figura 5.** Germinação (%) de sementes de soja obtidas de plantas submetidas aos tratamentos CC, DH e DH+BIO, cultivares CV1 e CV2. Letras minúsculas iguais não diferem pelo teste de Tukey ($p < 0,05$) e comparam tratamentos dentro de cada cultivar. Letras maiúsculas iguais não diferem pelo teste F ($p < 0,05$) e comparam cultivares dentro de cada tratamento.37
- Figura 6.** Índice de velocidade de emergência (IVE) de plântulas de soja obtidas de sementes oriundas de plantas submetidas aos tratamentos CC, DH e DH+BIO, cultivares CV1 e CV2. Letras minúsculas iguais não diferem pelo teste de Tukey ($p < 0,05$) e comparam tratamentos dentro de cada cultivar. Letras maiúsculas iguais não diferem pelo teste F ($p < 0,05$) e comparam cultivares dentro de cada tratamento.38
- Figura 7.** Índice de vigor relativo de sementes (A), comprimento da parte aérea (cm plântula^{-1}) (B) e comprimento da raiz primária (cm plântula^{-1}) (C) de plântulas de soja obtidas de sementes oriundas de plantas submetidas aos tratamentos C (controle), DH (déficit hídrico) e DH+BIO (déficit hídrico + bioestimulante à base de algas), das cultivares CV1 e CV2. Letras minúsculas iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$), comparando os tratamentos dentro de cada cultivar. Letras maiúsculas iguais não diferem entre si pelo teste F ($p < 0,05$), comparando as cultivares dentro de cada tratamento.39

Figura 8. Percentual de plântulas normais após o teste de envelhecimento acelerado de sementes de soja obtidas de plantas submetidas aos tratamentos CC, DH e DH + BIO, cultivares CV1 e CV2. Letras minúsculas iguais não diferem pelo teste de Tukey ($p < 0,05$) e comparam tratamentos dentro de cada cultivar. Letras maiúsculas iguais não diferem pelo teste F ($p < 0,05$) e comparam cultivares dentro de cada tratamento.....41

Figura 9. Atividade das enzimas superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT) e peroxidase (POX) em sementes de soja obtidas de plantas submetidas aos tratamentos controle (CC), déficit hídrico (DH) e déficit hídrico associado à aplicação de indutor de resistência (DH+BIO), nas cultivares CV1 e CV2. As barras representam a média $\pm$ erro-padrão da média. Letras minúsculas iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$), comparando os tratamentos dentro de cada cultivar. Letras maiúsculas iguais não diferem entre si pelo teste F ($p < 0,05$), comparando as cultivares dentro de cada tratamento.42

Figura 10. Índice de clorofila a (A) e Fluorescência de clorofila a (B) em sementes de soja obtidas de plantas submetidas aos tratamentos C (controle), DH (déficit hídrico) e DH+BIO (déficit hídrico + bioestimulante à base de algas). Letras minúsculas iguais não diferem pelo teste de Tukey ($p < 0,05$) e comparam tratamentos dentro de cada cultivar. Letras maiúsculas iguais não diferem pelo teste F ($p < 0,05$) e comparam cultivares dentro de cada tratamento. .45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Composição granulométrica e classificação textural do solo utilizado no experimento.	20
Tabela 2. Caracterização química do solo utilizado no experimento.	21

Sumário

1. INTRODUÇÃO	14
2. REVISÃO DE LITERATURA	16
3. MATERIAL E MÉTODOS	20
3.1. ETAPA I - Instalação e condução do experimento em casa de vegetação	20
Controle da umidade do solo e manejo da irrigação	23
3.2. Etapa II – Análise do potencial fisiológico das sementes	26
3.2.1. Testes fisiológicos	26
Determinação do grau de umidade	26
Teste de germinação	26
Primeira contagem de germinação	27
Envelhecimento acelerado	27
Emergência de plântulas	27
Teste de crescimento de plântulas por meio do sistema SAPL®	27
Fluorescência e índice de clorofila <i>a</i>	28
3.2.2. Determinações bioquímicas nas sementes	29
3.3. Análise estatística	30
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
4.1. Análises realizadas nas folhas	31
4.1.1. Potencial hídrico das folhas	31
4.1.2. Atividade das enzimas antioxidantes	32
4.2. Potencial fisiológico das sementes	35
4.2.1. Peso de mil sementes	35
4.2.2. Germinação (%)	36

4. 2.3 Índice de Velocidade de Emergência (IVE).....	37
4.2.4. Crescimento inicial e vigor de plântulas	39
4.2.5. Envelhecimento acelerado	40
4.2.6. Atividade das enzimas antioxidantes	42
4.2.7. Índice e fluorescência de clorofila <i>a</i>	45
5. CONCLUSÕES	46
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	47

1. INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max* L.) é uma das culturas agrícolas de maior importância para a economia mundial, destacando-se pelo elevado valor comercial e ampla versatilidade de uso (ARTUZO et al., 2018). No Brasil, a cultura ocupa posição de destaque entre os grãos, apresentando crescimento expressivo nas últimas décadas. Na safra 2024/2025, a produção nacional alcançou 171,5 milhões de toneladas, representando incremento de 20,2 milhões de toneladas em relação ao ciclo anterior, resultado do aumento da área cultivada e da elevada produtividade média, que atingiu 3.621 kg ha⁻¹, a maior já registrada no país (CONAB, 2025).

Esse avanço produtivo está associado à evolução científica e tecnológica do sistema agrícola brasileiro, bem como à adoção de práticas e insumos que visam sustentar a produtividade em cenários cada vez mais desafiadores. Entre esses desafios, destacam-se os estresses climáticos, especialmente aqueles relacionados à irregularidade na distribuição das chuvas e à ocorrência de períodos de déficit hídrico, os quais têm se intensificado em função das mudanças climáticas.

A disponibilidade hídrica é considerada um dos principais fatores limitantes da produtividade da cultura da soja. Estima-se que, para expressar seu potencial produtivo, a cultura necessite de aproximadamente 450 a 800 mm de água bem distribuídos ao longo do ciclo, variando conforme o genótipo e as condições ambientais (NEUMAIER et al., 2020). No Brasil, grande parte da produção é conduzida em sistema de sequeiro, tornando a cultura altamente dependente da regularidade das chuvas. O período compreendido entre a floração e o enchimento de grãos (R1–R6) é considerado o mais sensível ao déficit hídrico, podendo resultar em abortamento de flores e vagens, redução do tamanho e da massa das sementes e comprometimento da produtividade (NEUMAIER et al., 2020; MANAVALAN et al., 2009).

Além dos efeitos sobre o rendimento, o déficit hídrico durante os estádios reprodutivos pode comprometer a qualidade fisiológica das sementes produzidas. A restrição de água nesse período interfere no acúmulo de reservas, no metabolismo e na aquisição da qualidade fisiológica das sementes, resultando em redução da germinação, do vigor e da uniformidade de emergência, além do aumento da ocorrência de sementes imaturas ou com clorofila residual (DORNBOS JÚNIOR & MULLEN, 1989; GRAHL et al., 2022). Assim, a qualidade das sementes de soja é fortemente influenciada pelas condições ambientais às quais a planta-mãe é submetida durante o enchimento e a maturação das sementes (CARVALHO & NAKAGAWA, 2012).

Diante da dificuldade de controle das condições climáticas em campo, diferentes estratégias têm sido investigadas com o objetivo de aumentar a tolerância das plantas ao estresse hídrico, incluindo práticas de manejo agrônômico, abordagens fisiológicas e o uso de insumos com ação bioestimulante. Nesse contexto, os bioestimulantes à base de extratos de algas marinhas, especialmente da alga marrom *Ascophyllum nodosum*, têm despertado crescente interesse devido à sua capacidade de modular respostas fisiológicas das plantas, promovendo maior tolerância a estresses abióticos (KAPOORE et al., 2021; BOUTAHIRI et al., 2024).

Os extratos de *Ascophyllum nodosum* contêm diversos compostos bioativos, como reguladores de crescimento, polissacarídeos, antioxidantes e aminoácidos, capazes de influenciar processos relacionados ao crescimento, à eficiência nutricional e à resposta das plantas a condições adversas (SHUKLA et al., 2017). Estudos têm demonstrado que a aplicação desses bioestimulantes pode contribuir para a manutenção do estado hídrico, melhoria do desempenho fisiológico e aumento da tolerância das plantas ao déficit hídrico, com reflexos positivos na produtividade (MARTYNENKO et al., 2016; SHUKLA et al., 2017; BOUTAHIRI et al., 2024).

Apesar dos avanços no entendimento dos efeitos dos bioestimulantes sobre o desempenho fisiológico e produtivo das culturas, ainda são escassos os estudos que avaliam o impacto da aplicação desses produtos diretamente na planta-mãe sobre a qualidade fisiológica das sementes produzidas, especialmente sob condições de déficit hídrico. A maioria das pesquisas concentra-se na aplicação de bioestimulantes via tratamento de sementes, havendo uma lacuna de conhecimento quanto aos efeitos da aplicação foliar durante o ciclo da cultura, em especial na formação e desenvolvimento das sementes, e seus reflexos sobre a germinação, o vigor das sementes.

Diante desse contexto, torna-se relevante investigar estratégias que possam mitigar os efeitos do déficit hídrico não apenas sobre a produtividade da soja, mas também sobre a qualidade das sementes produzidas. Assim, o presente estudo teve como objetivo avaliar o efeito de um bioestimulante à base de *Ascophyllum nodosum* como indutor de tolerância ao déficit hídrico em plantas de soja e seus reflexos sobre a qualidade fisiológica das sementes, buscando contribuir para o desenvolvimento de práticas agrícolas mais sustentáveis e eficientes.

2. REVISÃO DE LITERATURA

A soja (*Glycine max* L.) ocupa papel importante na economia mundial, sendo cultivada em praticamente todas as regiões agrícolas do mundo (ARTUZO et al., 2018). No Brasil, a cultura destaca-se como a principal commodity agrícola, ocupando aproximadamente 47,4 milhões de hectares na safra 2024/25, o que corresponde a cerca de 58% da área cultivada com grãos, além de apresentar produção estimada em 169,5 milhões de toneladas, consolidando o país como o maior produtor e exportador mundial da oleaginosa (CONAB, 2025). Nesse contexto, a soja consolidou-se como um dos principais produtos da agricultura brasileira, fortalecendo a posição do país como um dos principais players no comércio agrícola mundial dessa cultura (ARTUZO et al., 2018).

Entre os estados brasileiros de maior destaque na produção dessa oleaginosa estão Mato Grosso, Paraná, Goiás e Rio Grande do Sul, que figuram entre os maiores produtores nacionais (CONAB, 2025). O crescimento da produção de soja no Brasil, que na safra 2024/25 alcançou estimativa recorde de aproximadamente 171,5 milhões de toneladas, está diretamente relacionado aos avanços científicos e à difusão de tecnologias no setor produtivo (CONAB, 2025).

No entanto, apesar dos avanços tecnológicos, diversos fatores ainda limitam a expressão do potencial produtivo da cultura, destacando-se a disponibilidade hídrica ao longo do ciclo, especialmente em sistemas de cultivo de sequeiro. A variabilidade pluviométrica e os eventos de seca estão fortemente associados às perdas de rendimento da soja no Brasil, sendo responsáveis por reduções significativas na produtividade quando comparados aos anos com condições hídricas mais favoráveis (FERREIRA et al., 2024).

O impacto do déficit hídrico torna-se mais pronunciado com o avanço do desenvolvimento das plantas, atingindo exigência máxima durante a floração (R1–R2), frutificação (R3–R4) e enchimento de grãos (R5–R6), estádios considerados os mais sensíveis à restrição de água. Dependendo da duração e intensidade do estresse, o déficit hídrico pode afetar negativamente o desenvolvimento das plantas e a produtividade da cultura (SILVA et al., 2015; MONTROYA et al., 2017; NEUMAIER et al., 2020). De modo geral, a escassez de água na fase reprodutiva induz à redução no número e tamanho de vagens e grãos, menor peso de sementes, senescência foliar antecipada e encurtamento do ciclo de vida da planta, comprometendo o enchimento de grãos (MANAVALAN et al., 2009).

A água é um fator essencial para o crescimento e desenvolvimento das plantas, e o déficit hídrico reduz o crescimento vegetal e a absorção de nutrientes, promovendo fechamento

estomático e consequente redução das taxas fotossintéticas. Esses efeitos resultam em queda de produtividade, associada ao maior abortamento de flores e vagens, bem como à redução do tamanho e peso dos grãos (NEUMAIER et al., 2020). Sob tais condições, ocorre a formação de espécies reativas de oxigênio (EROs), incluindo radicais livres, como o ânion superóxido e o radical hidroxila, além de moléculas não radicais, como o peróxido de hidrogênio e o oxigênio singlete (MITTLER, 2002).

Para se proteger dos danos oxidativos, as plantas dispõem de mecanismos de defesa antioxidativos enzimáticos e não enzimáticos, que podem atuar de forma integrada para a eliminação das EROs e manutenção da homeostase celular (MITTLER, 2002). O sistema antioxidante enzimático é constituído por enzimas como superóxido dismutase, catalase, glutathione peroxidase, peroxidase e ascorbato peroxidase (YOU; CHAN, 2015). Já os antioxidantes não enzimáticos incluem compostos como ascorbato, glutathione reduzida, carotenos e α -tocoferol (MITTLER, 2017). Embora esses mecanismos contribuam para minimizar os danos oxidativos, o acúmulo excessivo de EROs decorrente de déficit hídrico severo pode causar danos celulares irreversíveis (HASANUZZAMAN et al., 2020).

Considerando que as condições ambientais não podem ser controladas, diversas estratégias vêm sendo exploradas para ampliar a tolerância das plantas ao estresse hídrico, incluindo abordagens fisiológicas, nutricionais, biotecnológicas e práticas de manejo agrônomo. Dentre as técnicas agrícolas utilizadas para minimizar os danos causados por estresses ambientais, destaca-se o uso de bioestimulantes, que atuam modulando as respostas fisiológicas das plantas sob condições adversas (MARIANI et al., 2017).

Bioestimulantes são produtos que, aplicados em baixas doses, promovem melhorias no desenvolvimento vegetal. Esses produtos podem ser compostos por misturas de hormônios, ácidos húmicos, vitaminas, micronutrientes e extratos de algas marinhas, sendo utilizados com o objetivo de proteger as plantas e melhorar suas respostas adaptativas aos estresses ambientais (POVER et al., 2016). Dessa forma, atenuam os efeitos negativos do estresse, promovendo melhorias nos mecanismos de defesa, aumento do crescimento, das taxas fotossintéticas e, consequentemente, da produtividade, especialmente sob condições de estresse ambiental (MARTYNENKO et al., 2016).

Nesse contexto, destacam-se os bioestimulantes à base de extratos de algas marinhas, amplamente utilizados para melhorar o desenvolvimento de plantas cultivadas sob condições estressantes. A alga marrom *Ascophyllum nodosum* L. vem sendo amplamente processada pela indústria desses produtos devido à sua capacidade de aliviar o dano oxidativo nas plantas,

promovendo a eliminação de EROs, o aumento da síntese de antioxidantes enzimáticos e não enzimáticos, a redução da peroxidação lipídica e a melhoria do desempenho fotossintético (MARIANI et al., 2017; SANTANIELLO et al., 2017; SHARMA et al., 2019). Esses produtos contribuem para aumentar a adaptabilidade das plantas às condições de seca, retardando a senescência foliar, regulando a temperatura foliar e reduzindo os danos oxidativos aos tecidos (MARTYNENKO et al., 2016; SHUKLA et al., 2017). El Boukhari et al. (2023) demonstraram que esses bioestimulantes podem mitigar os efeitos do estresse hídrico em plantas de *Vicia faba* L. por meio de múltiplos mecanismos fisiológicos.

Diversos estudos também destacam a capacidade dos bioestimulantes à base de extratos de algas em modular o sistema antioxidante das plantas. Segundo Mughunth et al. (2024), observa-se aumento na produção de enzimas antioxidantes, como superóxido dismutase (SOD) e catalase (CAT), reduzindo o estresse oxidativo e protegendo as membranas celulares.

Resultados semelhantes foram observados em *Paspalum vaginatum*, no qual a aplicação de bioestimulantes reduziu a produção de espécies reativas de oxigênio (EROs) e aumentou a atividade do sistema antioxidante (SANTANIELLO et al., 2017). Esse aumento da capacidade antioxidante contribui para a manutenção da integridade estrutural e funcional das células vegetais sob condições de estresse (MENEZES et al., 2020).

A aplicação de extratos de algas também tem demonstrado efeitos positivos sobre a eficiência da absorção de nutrientes em diferentes culturas agrícolas. Estudos com milho e trigo relataram aumento na absorção e no aproveitamento de nutrientes minerais, associado ao maior crescimento e atividade metabólica das plantas (KOLLI et al., 2020; KAPOORE et al., 2021). Resultados semelhantes foram observados em hortaliças (GONZÁLEZ-PÉREZ et al., 2022). Na cultura da soja, Ali et al. (2021) relataram aumento na absorção de macronutrientes, como nitrogênio e potássio, fundamentais para o metabolismo energético e a formação de biomassa.

O aumento da eficiência nutricional é particularmente relevante para a soja, cultura que apresenta elevada demanda de nutrientes durante o enchimento de grãos, fase crítica para a definição do rendimento e da qualidade das sementes (MACHADO et al., 2020). Segundo Wang et al. (2023), plantas de soja tratadas com bioestimulantes à base de algas apresentaram maior vigor, menor redução da atividade fotossintética e maior peso de grãos sob estresse, efeito atribuído à presença de hormônios, antioxidantes e compostos osmoprotetores. Boutahiri et al. (2024) destacam o efeito positivo dos bioestimulantes no desempenho e produtividade de diversas culturas, tanto em condições normais quanto sob estresse.

Segundo Shukla et al. (2017), a aplicação de bioestimulantes à base de extratos de algas marinhas em plantas de soja aumentou a tolerância ao déficit hídrico, refletindo em melhor manutenção do estado hídrico, maior atividade antioxidante e menor redução da taxa fotossintética. Esses efeitos são atribuídos à presença de compostos bioativos, como reguladores de crescimento, polissacarídeos e antioxidantes. Assim, o uso de extratos de algas tem ganhado destaque na agricultura moderna, por serem produtos naturais e biodegradáveis, contribuindo para sistemas de produção mais sustentáveis (BOUTAHIRI et al., 2024), além de apresentarem baixo impacto ambiental quando extraídos de forma sustentável (FRANCO JUNIOR, 2017).

Grande parte dos estudos avalia os efeitos desses bioestimulantes sobre o desempenho fisiológico, nutricional e produtivo das plantas, sendo ainda escassas as informações relacionadas à produção e à qualidade de sementes. O déficit hídrico imposto à planta de soja durante o enchimento e a maturação das sementes compromete o acúmulo de reservas, o metabolismo e a aquisição de vigor, resultando em redução da germinação, do vigor e maior ocorrência de sementes imaturas ou com clorofila residual (DORNBOS JÚNIOR; MULLEN, 1989; GRAHL et al., 2022).

Esses efeitos evidenciam a importância do manejo adequado da disponibilidade hídrica nos estádios finais do ciclo, uma vez que tanto o déficit quanto o excesso de água após a maturidade fisiológica podem resultar em perdas na qualidade das sementes. Embora estudos indiquem que bioestimulantes influenciam positivamente respostas fisiológicas, crescimento e desempenho inicial das plântulas, a maioria das pesquisas concentra-se na aplicação via tratamento de sementes (APPIAH et al., 2026). Assim, permanecem limitados os trabalhos que avaliam a aplicação de bioestimulantes diretamente na planta-mãe e seus reflexos sobre a qualidade fisiológica das sementes produzidas sob condições de déficit hídrico, configurando uma lacuna de conhecimento relevante.

3.MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi conduzida no Departamento de Agronomia da Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa, Minas Gerais, Brasil, na janela agrícola da soja 2024/25 em duas etapas:

3.1. ETAPA I - Instalação e condução do experimento em casa de vegetação

O experimento foi conduzido em casa de vegetação, utilizando vasos com capacidade de 3,5 dm³, preenchidos com solo previamente peneirado. As propriedades físicas e químicas do solo, encontram-se apresentadas nas Tabelas 1 e 2, respectivamente.

A análise granulométrica do solo (Tabela 1) indicou predominância das frações areia e argila, resultando em classificação textural argilo-arenosa. Esse tipo de solo apresenta capacidade intermediária de retenção de água e boa drenagem, características que favorecem o controle da umidade em experimentos conduzidos em vasos. A textura argilo-arenosa permite rápida resposta do conteúdo hídrico do solo às lâminas de irrigação aplicadas, possibilitando a imposição e a manutenção precisa dos níveis de déficit hídrico.

Tabela 1. Composição granulométrica e classificação textural do solo utilizado no experimento.

Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila	Classificação textural
----- kg.kg ⁻¹ -----				
0,398	0,091	0,087	0,424	Argilo-arenosa

A caracterização química do solo (Tabela 2) revelou pH levemente ácido, elevada saturação por bases ($V = 78,5\%$) e ausência de alumínio trocável, indicando condições químicas adequadas ao cultivo da soja. Os teores de fósforo, potássio, cálcio e magnésio situaram-se em faixas consideradas adequadas a altas para a cultura, reduzindo a probabilidade de limitações nutricionais durante a condução do experimento. Dessa forma, as condições químicas do solo permitiram que os efeitos observados fossem atribuídos predominantemente aos tratamentos hídricos e à aplicação do bioestimulante, minimizando interferências decorrentes de deficiências nutricionais.

Tabela 2. Caracterização química do solo utilizado no experimento.

pH	P	K	Ca ⁺²	Mg ²⁺	Al ³⁺	H + Al	SB	t	T
(H ₂ O)	mg/dm ³		cmol _c /dm ³						
5,87	56,9	314	3,45	1,21	0	1,5	5,47	5,47	6,97
V	M	MO	P-Rem	S	B	Cu	Mn	Fe	Zn
%	dag/kg		mg/L	mg/dm ³					
78,5	0	3,06	34,6	90,4	0,47	2,71	181	52,8	4,44

Nota: pH determinado em água, KCl e CaCl₂ (relação 1:2,5); P, K, Fe, Zn, Mn e Cu extraídos por Mehlich-1; Ca²⁺, Mg²⁺ e Al³⁺ extraídos por KCl 1 mol L⁻¹; H + Al extraído por acetato de cálcio 0,5 mol L⁻¹ (pH 7,0); SB = soma de bases trocáveis; t = capacidade de troca catiônica efetiva; T = capacidade de troca catiônica a pH 7,0; V = saturação por bases; m = saturação por alumínio; MO = matéria orgânica (método Walkley–Black); S extraído por fosfato monocálcico em ácido acético.

A Figura 1 ilustra as principais etapas da condução do experimento em casa de vegetação. A semeadura foi realizada em 20/12/2024, distribuindo-se seis sementes por vaso (Figura 1A). No estágio fenológico V1 (FEHR & CAVINESS, 1977), realizou-se o desbaste, mantendo-se as duas plantas mais vigorosas por vaso (Figura 1B). Os vasos foram distribuídos aleatoriamente nas bancadas da casa de vegetação, onde as plantas foram conduzidas ao longo das diferentes fases de desenvolvimento (Figura 1C, D e E), até atingirem o estágio R8, correspondente à maturação plena, com aproximadamente 95% das vagens apresentando coloração típica de vagem madura (Figura 1F).

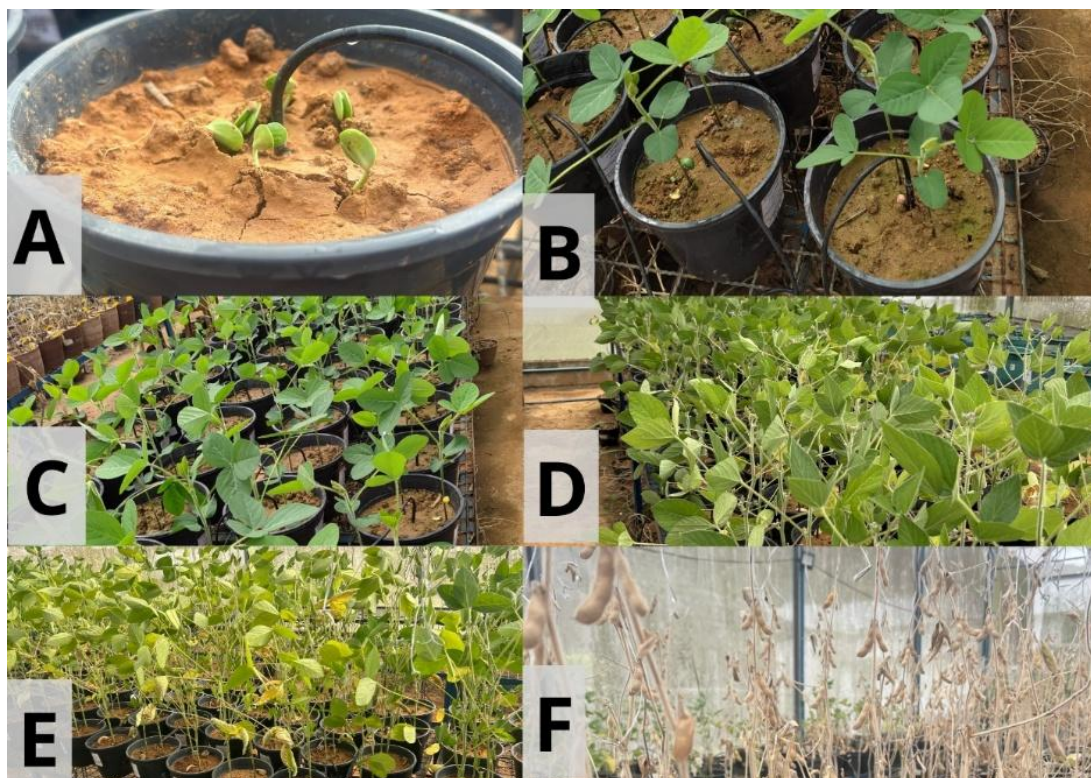


Figura 1. Ilustrações das principais etapas da condução do experimento em casa de vegetação. Emergência das plântulas após a semeadura (A); manutenção de duas plantas por vaso após o desbaste (B); plantas em diferentes fases de desenvolvimento, com os vasos distribuídos nas bancadas (C, D e E); e aspecto das plantas no estágio R8 (F).

Todos os tratos culturais foram realizados conforme as recomendações técnicas para a cultura da soja, incluindo manejo fitossanitário, controle de plantas daninhas, adubação de cobertura e condução da cultura, conforme descrito por Sedyama, Silva e Borém (2015).

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 2×3 , composto por dois cultivares de soja e três condições hídricas, com 40 repetições por tratamento, totalizando 240 unidades experimentais (vasos). Cada unidade experimental foi constituída por um vaso contendo duas plantas após o desbaste realizado no estágio V1.

Os tratamentos consistiram em: Controle (C), no qual a irrigação foi realizada sempre que necessária para manter a umidade do solo próxima à capacidade de campo até o estágio R7; Déficit Hídrico (DH), em que o solo foi mantido a 40% da capacidade de campo para a cultivar CV1 e a 50% para a cultivar CV2, do estágio R5 ao R7; e Déficit Hídrico + Bioestimulante (DH+BIO), no qual o solo foi mantido nas mesmas condições de déficit hídrico do tratamento DH, associado à aplicação foliar do bioestimulante Stingray® (1 L ha^{-1}) nos estádios R2, R4 e R5.3.

Para a determinação da capacidade de campo, todos os vasos foram inicialmente saturados e pesados individualmente, permitindo estabelecer o peso correspondente a 100% da capacidade de campo e, posteriormente, os pesos-alvo de cada tratamento hídrico.

A partir do estágio R7, a irrigação foi suspensa para todos os tratamentos, permitindo a desidratação natural das plantas e das sementes, procedimento adotado para favorecer a maturação final e evitar a deterioração da qualidade fisiológica das sementes. A colheita foi realizada quando as plantas atingiram o estágio R8, caracterizado pela maturação plena, com aproximadamente 95% das vagens apresentando a coloração típica da cultivar (Fehr & Caviness, 1977).

Controle da umidade do solo e manejo da irrigação

O monitoramento dos tratamentos hídricos foi realizado ao longo de todo o período experimental, com o objetivo de assegurar a correta imposição e manutenção dos níveis de irrigação previamente estabelecidos para cada cultivar.

O controle da umidade do solo nos vasos foi realizado por meio de método gravimétrico. Inicialmente, procedeu-se à determinação da capacidade de campo de cada vaso (40 vasos por tratamento), a partir da saturação completa do solo, seguida de drenagem livre até a obtenção de peso constante. O peso correspondente a essa condição foi considerado equivalente a 100% da capacidade de campo para cada unidade experimental.

A partir da determinação da capacidade de campo, estabeleceu-se o peso alvo dos vasos para cada nível de irrigação, calculado com base na fração da capacidade de campo desejada para cada tratamento hídrico. Para isso, utilizou-se a seguinte relação:

$$\text{Peso do vaso no tratamento} = \text{Peso do vaso na capacidade de campo} \times \text{Fração da capacidade de campo desejada}$$

Com base nesse procedimento, os tratamentos com restrição hídrica foram conduzidos mantendo-se o solo a 40% da capacidade de campo para a cultivar CV1 e a 50% da capacidade de campo para a cultivar CV2. Essas frações foram estabelecidas com o objetivo de induzir déficit hídrico moderado, observado previamente ao se determinar o ponto de murcha de cada cultivar, de modo a não comprometer a sobrevivência das plantas, possibilitando a avaliação de respostas fisiológicas e bioquímicas associadas à tolerância ao estresse hídrico.

Durante todo o período experimental, os vasos foram pesados periodicamente, em intervalos regulares, utilizando-se balança digital de precisão. A reposição de água foi realizada sempre que necessário, de modo a restabelecer o peso correspondente ao nível de umidade

previamente definido para cada tratamento. Esse procedimento permitiu o controle rigoroso da lâmina de irrigação aplicada, assegurando a manutenção contínua do estresse hídrico ao longo do experimento.

Avaliação do déficit hídrico na planta-mãe e análises bioquímicas nas folhas

A confirmação da imposição do estresse hídrico foi realizada por meio de avaliações fisiológicas das plantas.

A determinação do potencial hídrico foliar foi realizada no Laboratório de Hidráulica de Plantas da UFV. As coletas foram realizadas no período da manhã entre 11:00 h e 12:00 h, a fim de minimizar a influência de variações diurnas das condições ambientais. Foram selecionadas folhas completamente expandidas, fisiologicamente ativas, de mesma idade e localizadas na região mediana das plantas, garantindo a uniformidade das amostras. Após a coleta, as folhas foram imediatamente acondicionadas em sacos plásticos, mantidas em caixa térmica e encaminhadas ao laboratório para análise, de modo a preservar seu estado hídrico até o momento da avaliação.

O potencial hídrico foliar foi determinado por meio da câmara de pressão de Scholander, conforme metodologia clássica descrita por Scholander et al. (1965). As medições foram realizadas em folhas coletadas ao acaso de plantas de cada parcela experimental ($n = 18$ folhas), cada folha foi inserida individualmente na câmara, mantendo-se o limbo no interior do compartimento e o pecíolo exposto ao exterior. A pressão foi aplicada gradualmente com gás comprimido (nitrogênio) até o surgimento da primeira gota de seiva na extremidade do pecíolo, sendo o valor registrado considerado equivalente, em módulo, ao potencial hídrico foliar, expresso em MPa, calculando-se os valores médios obtidos para cada tratamento.

Determinações bioquímicas em folhas de soja

Para a análise da atividade das enzimas antioxidativas, folhas completamente expandidas do terço médio das plantas de soja foram coletadas no estágio fenológico de interesse. As amostras foram imediatamente congeladas em nitrogênio líquido e armazenadas a $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ até o momento das análises.

Os extratos enzimáticos brutos foram obtidos por meio da maceração de 0,2 g de tecido foliar em nitrogênio líquido, seguida da adição de 2 mL de meio de extração contendo tampão fosfato de potássio (0,1 M, pH 6,8), ácido etilenodiaminotetracético (EDTA) (0,1 mM), fluoreto de fenilmetilsulfônico (PMSF) (1,0 mM) e polivinilpolipirrolidona (PVPP) a 1% (p/v),

conforme descrito por Peixoto et al. (1999). O homogeneizado foi centrifugado a 19.000 g por 15 min, a 4 °C, sendo o sobrenadante utilizado para as determinações bioquímicas.

Determinação do teor de proteínas solúveis totais

O conteúdo de proteínas solúveis totais dos extratos foi determinado pelo método de Bradford (1976). Uma alíquota do extrato enzimático bruto foi adicionada ao reagente de Bradford (Coomassie Brilliant Blue G-250) e, após 5 min de incubação em temperatura ambiente, a absorbância foi determinada a 595 nm. A quantificação foi realizada utilizando curva padrão de albumina sérica bovina (BSA). Os resultados foram utilizados para o cálculo da atividade específica das enzimas superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT) e peroxidase (POX), sendo expressos por unidade de proteína.

Superóxido dismutase (SOD; EC 1.15.1.1)

A atividade da SOD foi determinada pela adição de 50 µL do extrato enzimático bruto a 2,95 mL de meio de reação contendo tampão fosfato de sódio 50 mM (pH 7,8), metionina 13 mM, azul de nitro tetrazólio (NBT) 75 µM, EDTA 0,1 mM e riboflavina 2 µM, conforme Del Longo et al. (1993). A reação foi conduzida a 25 °C em câmara iluminada por lâmpada fluorescente de 15 W. Após 5 min de exposição à luz, a formação de formazana azul foi determinada por absorbância a 560 nm.

O valor da absorbância de um meio de reação mantido no escuro foi utilizado como branco e subtraído das leituras das amostras iluminadas (Giannopolitis e Ries, 1977). Uma unidade de atividade da SOD foi definida como a quantidade de enzima capaz de inibir em 50% a fotoredução do NBT (Beauchamp e Fridovich, 1971). Os resultados foram expressos em U min⁻¹ mg⁻¹ proteína.

Catalase (CAT; EC 1.11.1.6)

A atividade da CAT foi determinada pela adição de 50 µL do extrato enzimático bruto a 2,95 mL de meio de reação constituído por tampão fosfato de potássio 50 mM (pH 7,0) e H₂O₂ 12,5 mM, conforme Havir e McHale (1987). O decréscimo na absorbância a 240 nm foi monitorado durante o primeiro minuto de reação a 25 °C. A atividade foi calculada utilizando o coeficiente de extinção molar de 36 M⁻¹ cm⁻¹ (Anderson, Prasad e Stewart, 1995), sendo os resultados expressos em µmol min⁻¹ mg⁻¹ proteína.

Peroxidase (POX; EC 1.11.1.7)

A atividade da POX foi determinada pela adição de 100 µL do extrato enzimático bruto a 2,90 mL de meio de reação contendo tampão fosfato de potássio 25 mM (pH 6,8), pirogalol 20 mM e H₂O₂ 20 mM, conforme Kar e Mishra (1976). A formação de purpurogalina foi monitorada pelo aumento da absorbância a 420 nm, a 25 °C. A atividade enzimática foi calculada utilizando o coeficiente de extinção molar de 2,47 mM⁻¹ cm⁻¹ (Chance e Maehly, 1955), sendo os resultados expressos em µmol min⁻¹ mg⁻¹ proteína.

Colheita das sementes

A colheita foi realizada quando as plantas atingiram o estágio R8 (Fehr e Caviness, 1977), maturação plena, com as sementes apresentando cerca de 15% de umidade. As vagens foram colhidas manualmente, realizando-se a trilha manual. As sementes obtidas de cada tratamento foram mantidas em bandejas, em ambiente de laboratório até atingirem cerca de 10% de umidade. Em seguida, foram acondicionadas em sacos de papel e armazenadas em câmara a 10°C. até a realização das análises em laboratório.

3.2. Etapa II – Análise do potencial fisiológico das sementes

3.2.1. Testes fisiológicos

Determinação do grau de umidade

A determinação do grau de umidade das sementes foi realizada em estufa a 105 °C por 24 h, conforme metodologia descrita nas Regras para Análise de Sementes (BRASIL, 2025). Foram utilizadas duas repetições por tratamento, sendo os resultados expressos em percentagem de água (% b.u.).

Teste de germinação

O teste de germinação foi conduzido com quatro repetições de 50 sementes por tratamento, distribuídas em rolos de papel toalha previamente umedecidos com quantidade de água equivalente a 2,5 vezes o peso do papel seco. Após a montagem, os rolos foram acondicionados em germinador regulado à temperatura constante de 25 °C.

As avaliações foram realizadas aos quatro e oito dias, após a instalação do teste, conforme os critérios estabelecidos pelas *Regras para Análise de Sementes* (BRASIL, 2025). Os resultados foram expressos em porcentagem de plântulas normais.

Primeira contagem de germinação

Conduzido em conjunto com o teste de germinação descrito acima, os resultados foram expressos em porcentagem média de plântulas normais obtidas no quinto dia após a semeadura.

Envelhecimento acelerado

Foi conduzido com quatro repetições de 50 sementes para cada tratamento, que foram distribuídas sobre tela metálica acoplada em caixas “gerbox”, contendo 40 mL de água no fundo e mantidas em BOD a 41 °C durante 48 horas (MARCOS FILHO, 2020). Após esse período, as sementes foram colocadas para germinar a 25 °C conforme descrito para o teste de germinação (BRASIL, 2009) e a avaliação da porcentagem de plântulas normais realizada no quinto dia após semeadura.

Emergência de plântulas

A emergência de plântulas foi avaliada utilizando-se 100 sementes por tratamento, distribuídas em quatro repetições de 25 sementes. A semeadura foi realizada em bandejas plásticas contendo substrato composto por solo e areia, previamente peneirados e homogeneizados, mantidos sob condições controladas de umidade. As sementes foram semeadas a profundidade uniforme e, após a semeadura, as bandejas foram irrigadas sempre que necessário, de modo a manter a umidade próxima à capacidade de campo.

As contagens de plântulas emergidas foram realizadas diariamente, considerando-se como emergidas aquelas que apresentaram os cotilédones visíveis acima da superfície do substrato. As avaliações foram conduzidas até a estabilização do número de plântulas emergidas.

Ao final do período de avaliação, foram determinados a porcentagem de emergência e o índice de velocidade de emergência (IVE), calculado conforme metodologia proposta por Maguire (1962).

Teste de crescimento de plântulas por meio do sistema SAPL®

A avaliação do crescimento das plântulas foi realizada utilizando o Sistema de Análise de Plântulas (SAPL®), conforme metodologia proposta por Medeiros (2018). Para a condução do teste, foram utilizadas quatro repetições de 20 sementes por tratamento, distribuídas sobre papel germitest previamente umedecido com água destilada, seguindo o mesmo procedimento adotado no teste de germinação.

As sementes foram mantidas em câmara de germinação, sob condições controladas de temperatura, até o terceiro dia após a semeadura.

Ao final desse período, as plântulas foram retiradas cuidadosamente do substrato e organizadas individualmente sobre uma superfície plana, de fundo contrastante, de forma a permitir a visualização nítida da parte aérea e da raiz. Junto às plântulas foi posicionada uma régua milimetrada, utilizada para a calibração das imagens. As fotografias foram obtidas com câmera digital, mantida em posição fixa e perpendicular ao plano de análise, buscando garantir padronização quanto à distância e à iluminação.

As imagens capturadas foram posteriormente analisadas pelo software SAPL®, previamente calibrado com base na escala métrica. A partir dessa análise, foram determinados o comprimento da parte aérea, o comprimento da raiz e o comprimento total das plântulas, considerando-se este último como a soma dos comprimentos da raiz e da parte aérea. Os valores obtidos foram expressos em milímetros por plântula (mm plântula^{-1}).

Fluorescência e índice de clorofila *a*

As sementes de cada tratamento, individualizadas em quatro repetições de 25 sementes, foram iluminadas com LEDs âmbar de alta intensidade (pico de 620 nm) com intensidade de luz saturante de $6,320 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ usando o equipamento SeedReporter™ (PHENOVATION B.V., Wageningen, Holanda) (Processo FAPESP n. 18/03793-5). Foi mensurada a fluorescência da clorofila *a*; para isso um chip CCD forneceu uma triagem rápida da emissão de fluorescência da clorofila em 730nm, gerando imagens com dimensão espacial de 2.448×2.448 pixels ($3,69 \mu\text{m/pixel}$). Concomitante, foi adquirido imagens da reflectância à 710 e 770 nm, para o cálculo do índice de clorofila *a* conforme descrito por Gitelson et al. (2003), de acordo com a seguinte fórmula:

$$\text{Índice de clorofila} = \left(\frac{\rho_{770}}{\rho_{710}} \right)^{-1}$$

onde ρ representa a refletância espectral para cada comprimento de onda.

Todos os parâmetros foram calculados pelo software SeedReporter™ versão 5.5.1.

3.2.2. Determinações bioquímicas nas sementes

Para a determinação da atividade das enzimas antioxidantes, as sementes foram previamente reidratadas em papel toalha umedecido por 16 horas, em germinador regulado a 25 °C, para facilitar a retirada do tegumento e a obtenção dos embriões.

Os extratos enzimáticos brutos das sementes foram obtidos por meio da maceração de aproximadamente 0,2 g de embriões (cotilédones e eixo embrionário), previamente separados após a retirada do tegumento, em nitrogênio líquido. Em seguida, foram adicionados 2 mL de tampão de extração composto por fosfato de potássio (0,1 M; pH 6,8), ácido etilenodiaminotetracético (EDTA; 0,1 mM), fluoreto de fenilmetilsulfônico (PMSF; 1,0 mM) e polivinilpolipirrolidona (PVPP; 1% p/v), conforme descrito por Peixoto et al. (1999). O homogeneizado foi centrifugado a $19.000 \times g$, por 15 min, a 4 °C, sendo o sobrenadante utilizado como extrato enzimático bruto para as determinações bioquímicas.

Determinação do teor de proteínas solúveis totais

O conteúdo de proteínas solúveis totais dos extratos foi quantificado segundo o método descrito por Bradford (1976). Para a reação, uma alíquota do extrato enzimático bruto foi adicionada ao reagente de Bradford (Coomassie Brilliant Blue G-250) e, após 5 minutos de incubação em temperatura ambiente, a absorbância foi determinada a 595 nm. A quantificação foi realizada utilizando curva padrão de albumina sérica bovina (BSA). O teor de proteínas foi utilizado para o cálculo da atividade específica das enzimas superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT) e peroxidase (POX), sendo os resultados expressos por unidade de proteína.

Superóxido dismutase (SOD; EC 1.15.1.1): A atividade da SOD foi determinada pela adição de 50 µL do extrato enzimático bruto a 2,95 mL de meio de reação, constituído de tampão fosfato de sódio 50 mM, pH 7,8, contendo metionina 13 mM, azul de p-nitro tetrazólio (NBT) 75 µM, EDTA 0,1 mM e riboflavina 2 µM (DEL LONGO et al., 1993). A reação foi conduzida a 25 °C, em uma câmara de reação iluminada com uma lâmpada fluorescente de 15 W. Após 5 min de exposição à luz, a iluminação foi interrompida e a formazana azul, produzida pela fotorredução do NBT, foi medida pela absorbância a 560 nm.

O valor da absorbância de um meio de reação igual ao anterior, mas mantido no escuro pelo mesmo período, serviu como branco e foi subtraído da leitura de cada amostra que recebeu iluminação (GIANNOPOLITIS; RIES, 1977). Uma unidade de SOD foi definida como a

quantidade de enzima necessária para inibir em 50% a fotorredução do NBT (BEAUCHAMP; FRIDOVICH, 1971). O resultado foi expresso em $\text{U min}^{-1} \text{mg}^{-1}$ proteína.

Catalase (CAT; EC 1.11.1.6): A atividade da CAT foi determinada pela adição de 50 μL do extrato enzimático bruto a 2,95 mL de meio de reação, constituído de tampão fosfato de potássio 50 mM, pH 7,0 e H_2O_2 12,5 mM (adaptado de HAVIR; McHALE, 1987). O decréscimo na absorbância a 240 nm, a 25 °C, foi medido durante o primeiro minuto de reação. A atividade enzimática foi calculada utilizando-se o coeficiente de extinção molar de $36 \text{ M}^{-1} \text{cm}^{-1}$ (ANDERSON; PRASAD; STEWART, 1995), sendo o resultado expresso em $\mu\text{mol min}^{-1} \text{mg}^{-1}$ proteína.

Peroxidase (POX; EC 1.11.1.7): A atividade da POX foi determinada pela adição de 100 μL do extrato enzimático bruto a 2,90 mL de meio de reação, constituído de tampão fosfato de potássio 25 mM, pH 6,8, pirogalol 20 mM e H_2O_2 20 mM (adaptado de KAR; MISHRA, 1976). A produção de purpurogalina foi medida por meio do incremento da absorbância a 420 nm, a 25 °C. A atividade enzimática foi calculada utilizando-se o coeficiente de extinção molar de $2,47 \text{ M}^{-1} \text{cm}^{-1}$ (CHANCE; MAEHLI, 1955), sendo o resultado expresso em $\mu\text{mol min}^{-1} \text{mg}^{-1}$ proteína.

3.3. Análise estatística

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA), considerando-se os efeitos de cultivar, condição hídrica e da interação cultivar $\times$ condição hídrica. Previamente, foram verificados os pressupostos de normalidade dos resíduos e homogeneidade das variâncias, por meio dos testes de Shapiro–Wilk e Levene, respectivamente. Quando constatado efeito significativo da interação, procedeu-se ao seu desdobramento, comparando-se as condições hídricas dentro de cada cultivar pelo teste de Tukey e as cultivares dentro de cada condição hídrica pelo teste F. Na ausência de interação significativa, foram avaliados os efeitos principais dos fatores. Adotou-se o nível de 5% de probabilidade em todas as análises. Todas as análises estatísticas foram realizadas utilizando-se o software R (R Core Team, 2018).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Análises realizadas nas folhas

4.1.1. Potencial hídrico das folhas

O potencial hídrico foliar foi significativamente influenciado pelas condições hídricas e pelo genótipo avaliado, com maiores valores para a condição de capacidade de campo (controle) e valores menores sob déficit hídrico (DH), especialmente na cultivar CV1 (Figura 2).

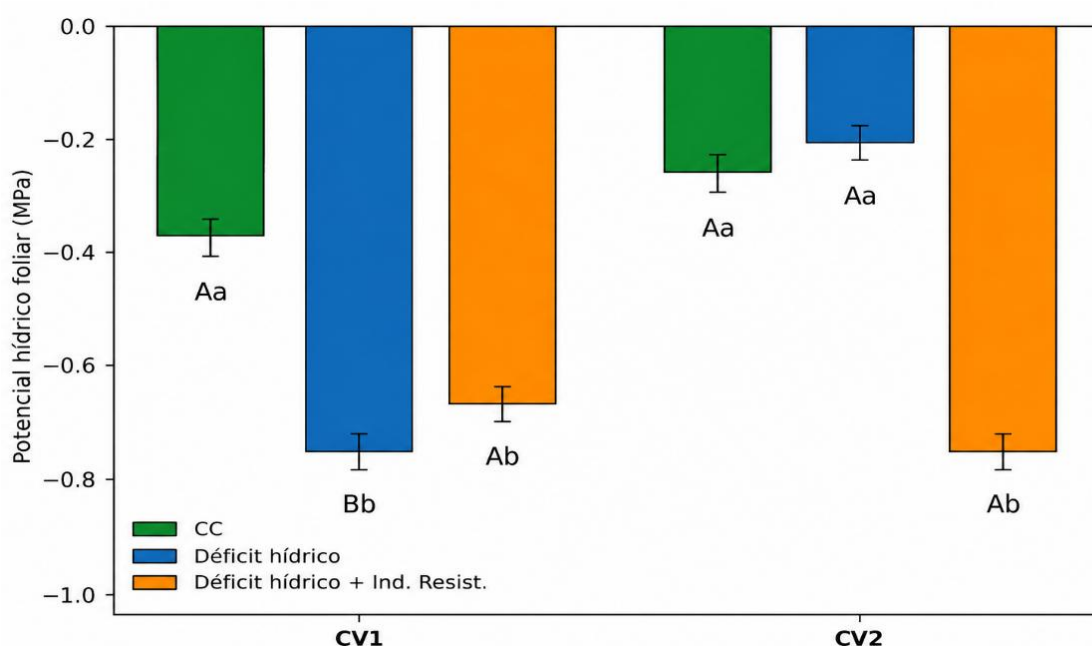


Figura 2. Potencial hídrico foliar de cultivares de soja submetidas aos tratamentos CC (capacidade de campo), DH (déficit hídrico) e DH + BIO (déficit hídrico + indutor de resistência à base de algas). Barras representam a média $\pm$ erro-padrão. Letras minúsculas iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$), comparando os tratamentos dentro de cada cultivar. Letras maiúsculas iguais não diferem entre si ($p < 0,05$), comparando as cultivares dentro de cada tratamento.

Ao se comparar os tratamentos para cada cultivar, observa-se que para a cv. CV1, sob; condição de capacidade de campo (controle –CC), as folhas apresentaram os maiores valores de potencial hídrico, indicando adequado suprimento de água na planta em relação aos demais tratamentos (DH e DH + BIO) (Figura 2). Já para a cultivar CV2, os valores observados no CC não diferiram do DH, sendo superiores aos obtidos no DH+BIO (Figura 2). Assim, não houve

efeito positivo da aplicação do bioestimulante no aumento do potencial hídrico das folhas de ambas as cultivares.

Ao se comparar os cultivares, não houve diferença entre elas sob condição de CC e sob DH+BIO. Contudo, sob condição de DH, o potencial hídrico das folhas da cv. CV1 foi inferior ao obtido para a cv. CV2 (Figura 2), evidenciando maior sensibilidade desse genótipo à restrição hídrica.

4.1.2. Atividade das enzimas antioxidantes

A atividade das enzimas antioxidantes SOD, CAT e POX nas folhas foi influenciada pelas condições hídricas, com respostas dependentes da cultivar avaliada (Figura 3).

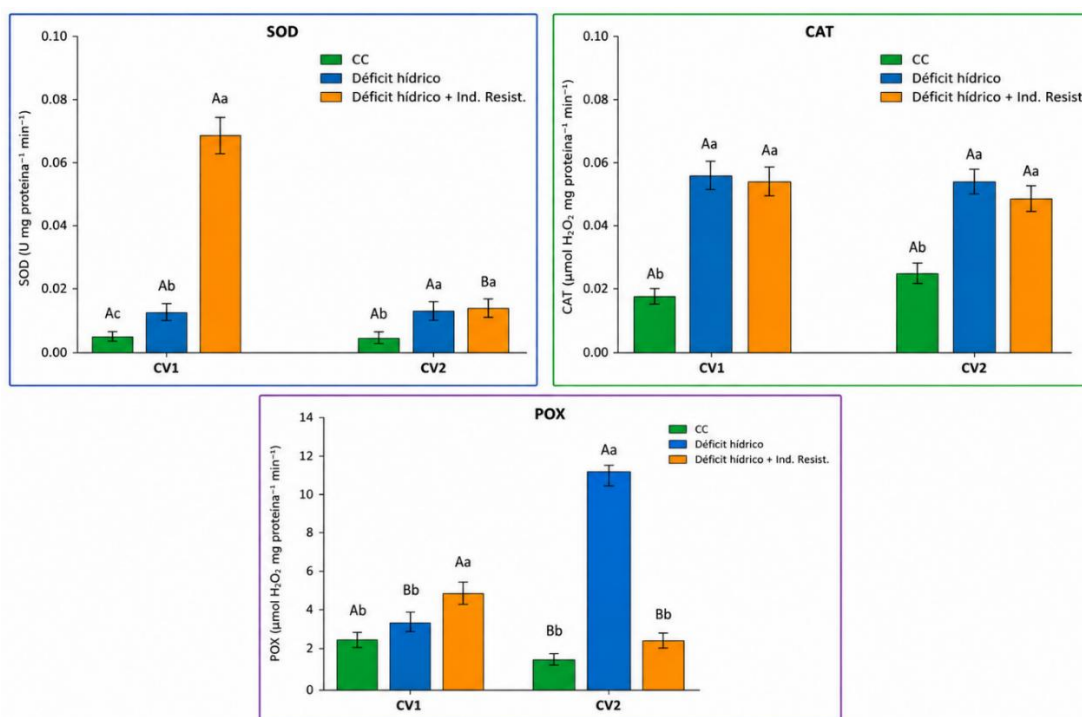


Figura 3. Atividade das enzimas superóxido dismutase (SOD; A), catalase (CAT; B) e peroxidase (POX; C) em folhas de soja provenientes de plantas submetidas aos tratamentos CC (capacidade de campo), DH (déficit hídrico) e DH+BIO (déficit hídrico + indutor de resistência à base de algas). Letras minúsculas iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$), comparando os tratamentos dentro de cada cultivar. Letras maiúsculas iguais não diferem entre si ($p < 0,05$), comparando as cultivares dentro de cada tratamento. As barras representam a média $\pm$ erro-padrão.

A atividade da SOD nas folhas das plantas da cultivar CV1 foi maior com emprego do bioestimulante na condição de déficit hídrico (DH+BIO) em comparação com os demais tratamentos, com menor atividade na condição CC (Figura 3A). Para a cultivar CV2, menor

atividade da SOD foi obtida no tratamento controle, com maiores valores nos tratamentos DH e DH+BIO.

Estes resultados indicam que sob déficit hídrico a atividade antioxidante nas células aumentou, sendo que para a cv. CV1 houve atividade mais alta sob DH+BIO. Não houve diferença significativa entre as cultivares quanto à atividade da SOD tanto no controle como sob DH isolado (Figura 3 A). Contudo, com a aplicação do bioestimulante à base de algas, a atividade foi maior nas folhas da cultivar CV1 em comparação com CV2 (Figura 3A). Estes resultados podem ser um indicativo de que a aplicação do bioestimulante à base de algas contribuiu para aumentar a atividade antioxidante nas plantas, ainda que dependente do genótipo, como estratégia para auxiliar na proteção celular sob condição de déficit hídrico, uma vez que a atividade da SOD sob DH isolado foi inferior à obtida no tratamento DH+BIO para esta cultivar (Figura 3A). A superóxido dismutase (SOD) é reconhecida como a primeira linha de defesa antioxidante em plantas submetidas ao estresse hídrico, sendo responsável pela conversão do radical superóxido (O_2^-) em H_2O_2 , desempenhando papel central na proteção celular durante condições de estresse abiótico (MITTLER, 2002), o que explica seu aumento na condição estressante aplicada nas planta-mãe de soja.

Com relação à atividade da CAT (Figura 3B), não houve diferença entre as cultivares dentro de cada tratamento. Ao se comparar os tratamentos dentro de cada cultivar, observou-se, para a cultivar CV1, aumento significativo nas folhas de plantas dos tratamentos DH e DH+BIO quando comparados ao tratamento controle (C; solo na capacidade de campo), com maiores valores para DH+BIO. Já para a cv. CV2, menor atividade também foi obtida no controle, com maiores valores nos tratamentos DH e DH+BIO que não diferiram entre si.

Esse aumento indica uma ativação do sistema antioxidante enzimático em resposta ao estresse hídrico, mecanismo relatado em estudos que reforçam que a modulação da atividade da CAT está associada não apenas à intensidade do estresse, mas também à eficiência de produtos bioindutores em reduzir a geração de espécies reativas de oxigênio (FIALHO et al., 2022). O aumento da CAT nestes tratamentos pode ser um indicativo de que as plantas ativam rotas protetoras contra a ação de espécies reativas de oxigênio (EROs), minimizando danos oxidativos às membranas e estruturas celulares (MITTLER, 2017).

Esses achados corroboram estudos prévios que destacam o papel da CAT como biomarcador de tolerância ao estresse hídrico em soja (CARVALHO et al., 2020). O aumento da atividade da CAT em folhas de plantas sob déficit hídrico está diretamente associado ao acúmulo de peróxido de hidrogênio (H_2O_2), um dos principais metabólitos reativos gerados

durante o estresse hídrico em plantas. A CAT atua na decomposição do H_2O_2 em água e oxigênio, sendo essencial para a manutenção da integridade das membranas celulares e da maquinaria fotossintética (MITTLER, 2017).

Para a cultivar CV1, os tratamentos controle e DH não diferiram entre si quanto à atividade da POX e apresentaram valores inferiores aos observados no tratamento DH+BIO (Figura 3C). Este aumento também foi constatado para a CAT (Figura 3B) quando se compara DH+BIO com o controle.

Ou seja, a aplicação do bioestimulante à base de extrato de algas mostrou-se eficiente para aumentar a atividade antioxidante nas células, possivelmente reforçando os mecanismos de defesa contra o acúmulo de espécies reativas de oxigênio assim como também verificado para a SOD (Figura 3A). Em contraste, para a cultivar CV2 observou-se aumento expressivo da atividade da POX sob déficit hídrico isolado (DH) em relação aos demais tratamentos, que não diferiram entre si (Figura 3C), evidenciando uma resposta antioxidante mais intensa em resposta ao estresse hídrico.

Estudos recentes em soja demonstram que a redução da atividade da POX após aplicação de bioestimulantes está relacionada à atenuação do estresse oxidativo e à melhoria do status fisiológico das plantas de soja (PETER et al., 2024). Corroborando o comportamento observado na CV2.

Comparando-se as cultivares, observa-se que sob DH, a atividade da POX foi superior nas folhas da cultivar CV2, enquanto nos demais tratamentos maior atividade foi obtida nas folhas de plantas da CV1 (Figura 3C). Esse comportamento pode estar associado a uma resposta antioxidante mais intensa da cv. CV2 ao déficit hídrico, possivelmente em decorrência da maior produção de espécies reativas de oxigênio e da consequente ativação da POX como mecanismo de defesa (Figura 3C). A maior atividade da POX nos tratamentos controle e DH+BIO observado para a cv. CV1 em relação a CV2 (Figura 3C), sugere que a aplicação do bioestimulante à base de algas foi mais eficaz para atenuar o estresse oxidativo no cultivar CV1, o que é consoante com o que foi observado para a SOD (Figura 3A).

A POX desempenha papel central na resposta antioxidante ao estresse hídrico, especialmente em condições de estresse prolongado, atuando tanto na detoxificação do H_2O_2 quanto no fortalecimento da parede celular por meio da lignificação (GILL; TUTEJA, 2010). O aumento expressivo da POX em genótipos mais sensíveis, como observado na cultivar CV2 (Figura 3C), está frequentemente associado à maior produção de espécies reativas de oxigênio e à necessidade de respostas antioxidantes mais intensas (APEL; HIRT, 2004).

Em síntese, observa-se que o déficit hídrico aplicado nas plantas de soja de ambas as cultivares nos estádios R5 e R7, tanto isolado como combinado com aplicação de bioestimulante à base de alga, promoveu aumento na atividade das enzimas SOD e CAT nas folhas em relação ao controle (Figura 3A e 3B). Já com relação à POX (Figura 3C), o aumento da atividade foi constatado para a cv. CV2 sob DH isolado e para a cv. CV1 no tratamento DH+BIO. Estes resultados reforçam a ativação de mecanismos antioxidantes em plantas submetidas a condições de estresses abióticos, especialmente sob déficit hídrico (MITTLER et al., 2017). Apenas para a cv. CV1, o tratamento DH+BIO promoveu maior atividade da SOD e da POX em relação aos demais tratamentos, indicando uma possível ação do bioestimulante à base de algas na indução de mecanismos de tolerância ao déficit hídrico.

Os bioestimulantes, principalmente à base de extratos de algas marrons (*Ascophyllum nodosum*), contêm uma combinação de hormônios vegetais, como auxinas, citocininas e giberelinas, além de compostos antioxidantes e polissacarídeos que atuam diretamente na regulação do metabolismo das plantas e na promoção do crescimento radicular e da parte aérea (KAPOORE et al., 2021).

Tais compostos podem contribuir para aumentar a resistência a condições de estresse, devido a sua capacidade de aliviar o dano oxidativo nas plantas, via eliminação de EROs e aumento da síntese de enzimas antioxidantes (SHARMA et al., 2019). Alguns estudos destacam a capacidade destes bioestimulantes em modular o sistema antioxidante das plantas sob estresse, via aumento da atividade de SOD e CAT (SANTANIELLO et al., 2017; MUGHUNTH et al., 2024), corroborando com a presente pesquisa.

4.2. Potencial fisiológico das sementes

4.2.1. Peso de mil sementes

Os resultados referentes ao peso de 1000 sementes (Figura 4) indicam que o estresse hídrico afetou de forma diferenciada os genótipos avaliados. Houve redução no peso de mil sementes em função do DH e em sequência do DH+BIO em relação ao controle, apenas para a cultivar CV2 (Figura 4).

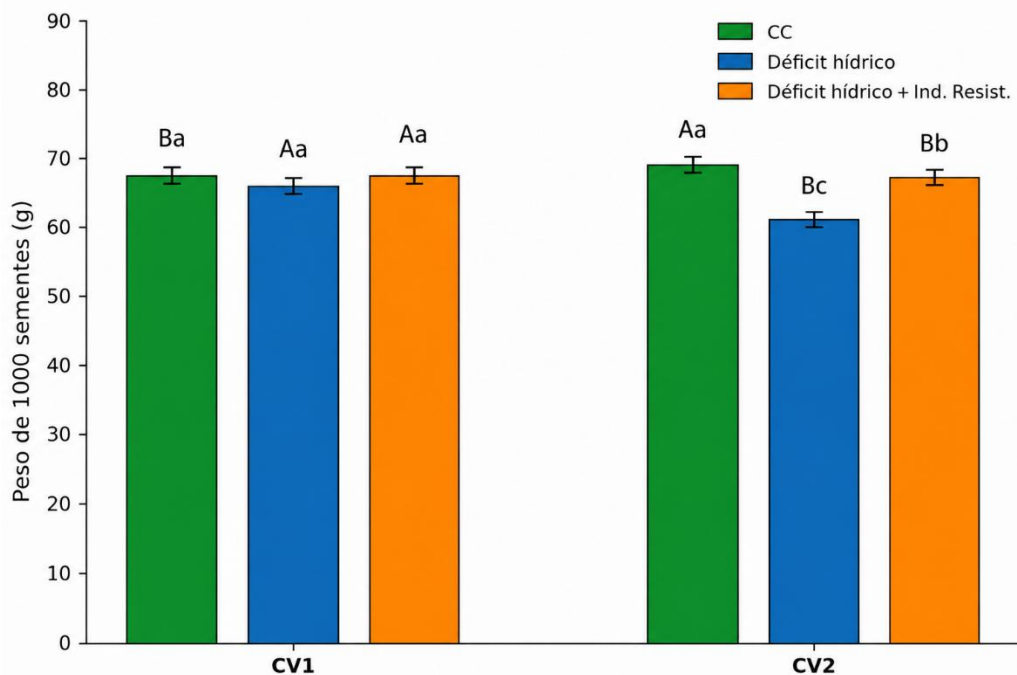


Figura 4. Peso de mil sementes (g) de soja obtidas de plantas submetidas aos tratamentos CC, DH e DH+BIO, cultivares CV1 e CV2. Letras minúsculas iguais não diferem pelo teste de Tukey ($p < 0,05$) e comparam tratamentos dentro de cada cultivar. Letras maiúsculas iguais não diferem pelo teste F ($p < 0,05$) e comparam cultivares dentro de cada tratamento.

A incipiência no acúmulo de massa em função do DH ocorre devido à limitação de água o que pode ter contribuído para reduzir a translocação de fotoassimilados, comprometendo o acúmulo de reservas nas sementes, conforme relata Pimentel et al. (2018). A aplicação do tratamento DH+BIO contribuiu para atenuar a perda do acúmulo de massa das sementes do genótipo CV2 (Figura 4).

Por outro lado, o genótipo CV1 manteve a estabilidade do peso das sementes em todos os tratamentos (Figura 4), o que pode indicar maior tolerância ao DH. Essa resposta pode estar associada à maior eficiência fisiológica no uso da água e manutenção da atividade fotossintética sob estresse, garantindo o enchimento adequado dos grãos (PRAJAPATI et al., 2023.).

4.2.2. Germinação (%)

A germinação das sementes de ambas as cultivares foi reduzida pelo DH imposto à planta-mãe em ambas as cultivares, enquanto o tratamento controle e DH+BIO não diferiram significativamente (Figura 5). Estes dados indicam que a aplicação do bioestimulante à base de algas nas plantas submetidas ao déficit hídrico foi benéfica para manter a germinação das sementes em nível de alta performance comercial ($> 90\%$); isto sugere ativação de mecanismos

fisiológicos e bioquímicos de defesa capazes de mitigar os efeitos do déficit hídrico na aquisição da germinação das sementes, a qual ocorre na fase de maturação em que a condição de DH foi aplicada (Figura 5).

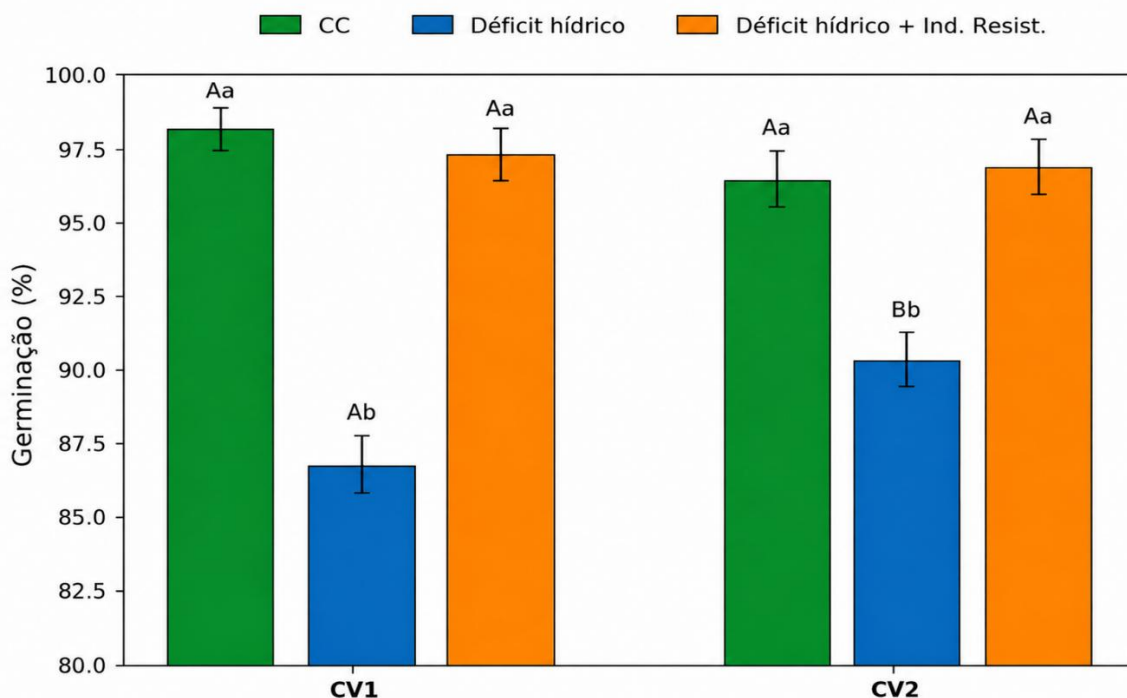


Figura 5. Germinação (%) de sementes de soja obtidas de plantas submetidas aos tratamentos CC, DH e DH+BIO, cultivares CV1 e CV2. Letras minúsculas iguais não diferem pelo teste de Tukey ($p < 0,05$) e comparam tratamentos dentro de cada cultivar. Letras maiúsculas iguais não diferem pelo teste F ($p < 0,05$) e comparam as cultivares dentro de cada tratamento.

Ao se comparar as cultivares, verifica-se redução na germinação das sementes da cv. CV1 em relação a cultivar CV2 apenas no tratamento em que a planta-mãe foi submetida ao déficit hídrico (Figura 5).

A redução da germinação das sementes obtidas de plantas sob déficit hídrico evidencia o efeito negativo da restrição hídrica durante o enchimento e a maturação das sementes, provavelmente por restrição ao fluxo de nutrientes planta-semente durante período crítico para a aquisição da capacidade de germinação.

4. 2.3 Índice de Velocidade de Emergência (IVE)

Assim como observado para a germinação, o DH promoveu redução no IVE (Figura 6) em ambas as cultivares em relação aos demais tratamentos, evidenciando comprometimento do vigor das sementes produzidas sob restrição hídrica. Contudo, a aplicação do bioestimulante às plantas sob déficit hídrico (DH+BIO) equiparou o IVE ao observado no controle (Figura 6). Não houve diferença significativa entre as cultivares quanto à velocidade de emergência nos diferentes tratamentos.

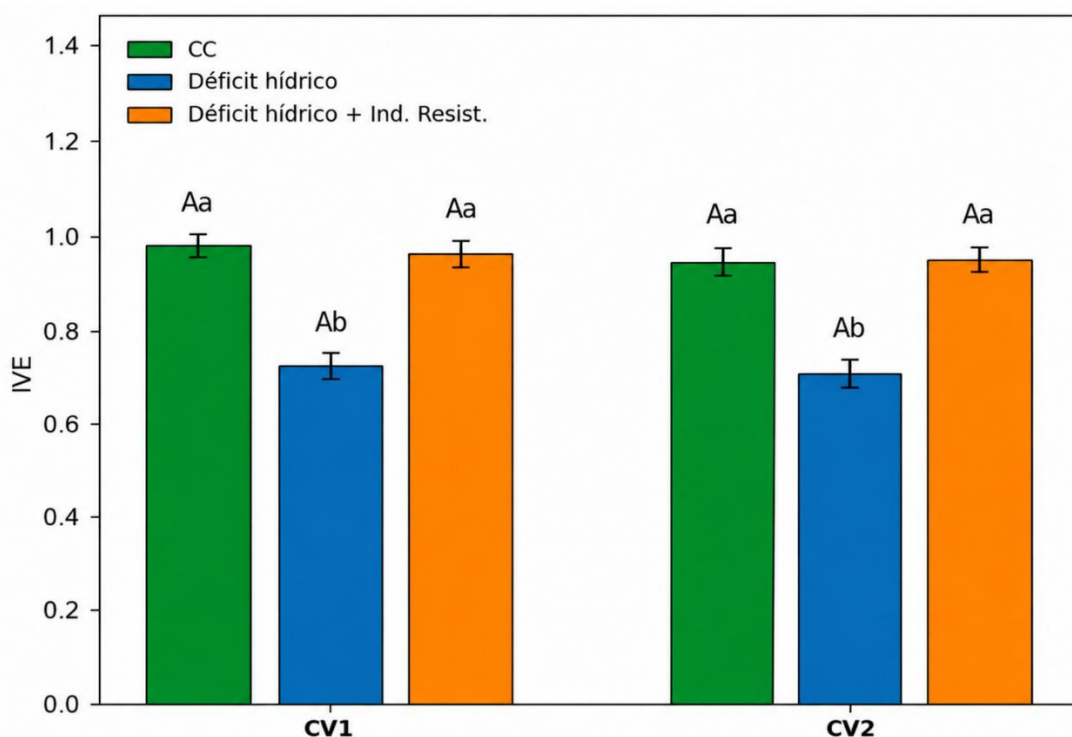


Figura 6. Índice de velocidade de emergência (IVE) de plântulas de soja obtidas de sementes oriundas de plantas submetidas aos tratamentos CC, DH e DH+BIO, cultivares CV1 e CV2. Letras minúsculas iguais não diferem pelo teste de Tukey ($p < 0,05$) e comparam tratamentos dentro de cada cultivar. Letras maiúsculas iguais não diferem pelo teste F ($p < 0,05$) e comparam cultivares dentro de cada tratamento.

Trabalhos recentes indicam que bioestimulantes podem atenuar os efeitos do estresse hídrico ao favorecer a estabilidade das membranas celulares e a manutenção do metabolismo respiratório, resultando em maior porcentagem de plântulas emergidas sob condições adversas (ALMAKAS et al., 2023), conforme observado no presente estudo.

O IVE reflete a rapidez e a uniformidade do estabelecimento inicial das plântulas e é amplamente utilizado como indicador do potencial fisiológico das sementes (Marcos-Filho, 2015). Estudos recentes com soja demonstram que o estresse hídrico durante a formação das

sementes pode comprometer o seu desempenho em campo por ocasião da semeadura, resultando em estandes desuniformes e menor competitividade inicial das plantas (BURNER et al., 2026). Segundo Finch-Savage e Bassel (2016), sementes com menor vigor apresentam maior sensibilidade a estresses ambientais, o que compromete a velocidade de estabelecimento das plântulas em campo; o que pode ser validado no presente estudo, onde o DH promoveu a formação de sementes com menor porcentagem e velocidade de germinação.

4.2.4. Crescimento inicial e vigor de plântulas

O uso de bioestimulante sob condição de déficit hídrico (DH+BIO) incrementou o crescimento da raiz primária, de parte aérea e o índice de vigor relativo; enquanto na condição de DH estes índices foram sempre significativamente menores (Figura 7). Verificou-se, ainda, que tanto o índice de vigor relativo como os comprimentos de parte aérea e de raiz primária das plântulas foram maiores para a CV1 em relação à CV2 em todos os tratamentos.

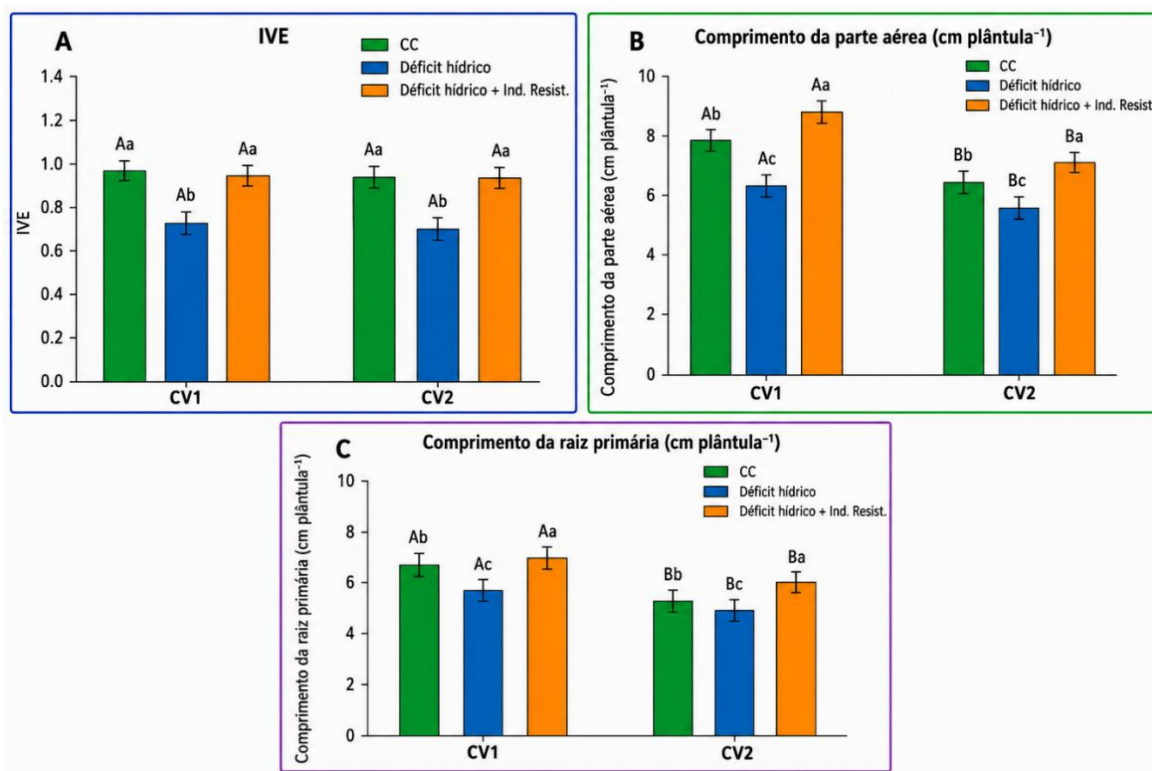


Figura 7. Índice de vigor relativo de sementes (A), comprimento da parte aérea (cm plântula⁻¹) (B) e comprimento da raiz primária (cm plântula⁻¹) (C) de plântulas de soja obtidas de sementes oriundas de plantas submetidas aos tratamentos C (controle), DH (déficit hídrico) e DH+BIO (déficit hídrico + bioestimulante à base de algas), das cultivares CV1 e CV2. Letras minúsculas iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey (p<0,05), comparando os tratamentos dentro de

cada cultivar. Letras maiúsculas iguais não diferem entre si pelo teste F ($p < 0,05$), comparando as cultivares dentro de cada tratamento.

O crescimento inicial das plântulas é um dos componentes mais sensíveis ao estresse hídrico, pois depende diretamente da expansão celular, do balanço hídrico e da eficiência metabólica nos estádios iniciais de desenvolvimento (TAIZ et al., 2017).

A redução do vigor sob déficit hídrico está associada à limitação da turgescência celular e ao comprometimento da mobilização de reservas, resultando em menor crescimento inicial e menor capacidade de estabelecimento das plântulas (LAWLOR; TEZARA, 2009).

Em síntese, os resultados relativos ao crescimento de plântulas demonstram que o déficit hídrico compromete o crescimento inicial e o vigor das plântulas de soja, enquanto o uso do bioestimulante à base de alga contribui para a mitigação desses efeitos, promovendo recuperação do vigor, da altura da parte aérea e do desenvolvimento radicular.

As diferenças observadas entre as cultivares reforçam o papel do componente genético na tolerância ao estresse hídrico, indicando que genótipos com maior estabilidade fisiológica, como a CV1, respondem de forma mais eficiente à aplicação de indutores no que diz respeito ao crescimento de plântulas de sementes provindas deste tratamento.

4.2.5. Envelhecimento acelerado

Não houve diferença entre os tratamentos para as sementes da cv. CV1 quanto ao vigor pelo teste de envelhecimento acelerado. Contudo, para a cv. CV2, houve redução do vigor das sementes oriundas da condição de DH em comparação com o C e DH+BIO, os quais não diferiram entre si (Figura 8).

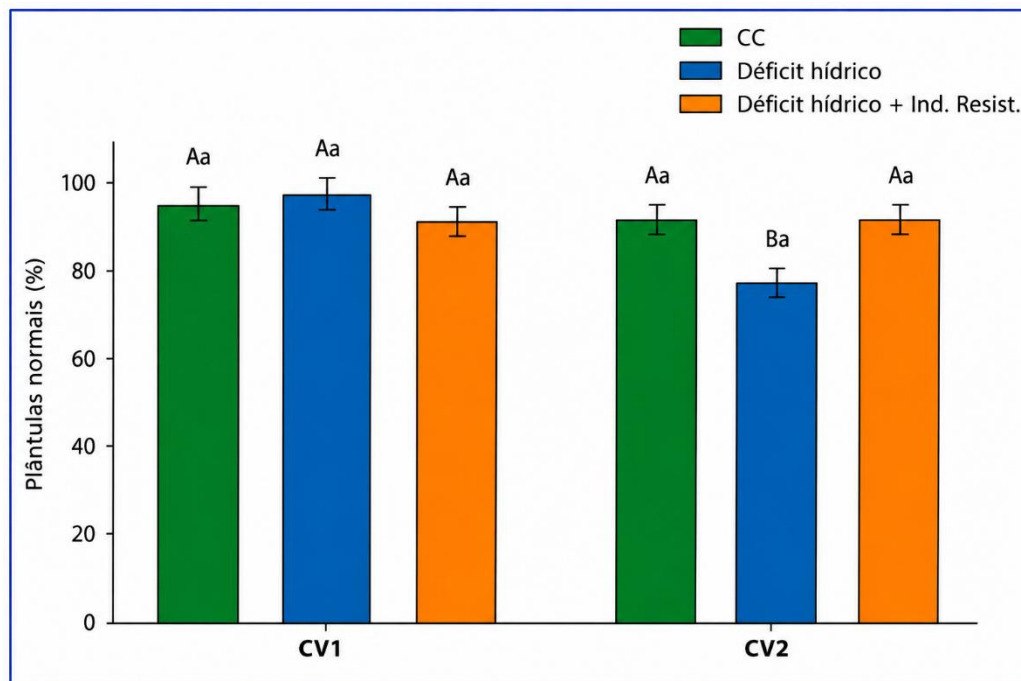


Figura 8. Percentual de plântulas normais após o teste de envelhecimento acelerado de sementes de soja obtidas de plantas submetidas aos tratamentos CC, DH e DH + BIO, cultivares CV1 e CV2. Letras minúsculas iguais não diferem pelo teste de Tukey ($p < 0,05$) e comparam tratamentos dentro de cada cultivar. Letras maiúsculas iguais não diferem pelo teste F ($p < 0,05$) e comparam cultivares dentro de cada tratamento.

O teste de envelhecimento acelerado é amplamente utilizado para estimar a longevidade e a tolerância das sementes ao estresse oxidativo (WALTERS et al., 2010). O menor vigor das sementes da cv. CV2 do tratamento DH pode ser um indicativo da sensibilidade ao acúmulo de danos oxidativos não reparados durante o desenvolvimento (BAILLY, 2004). Estudos recentes confirmam que sementes com maior atividade antioxidante apresentam melhor desempenho após o envelhecimento acelerado, especialmente quando provenientes de plantas tratadas com bioestimulantes (WANG, 2023.).

Como verificado, a associação do bioestimulante ao déficit hídrico promoveu recuperação significativa do desempenho das sementes no teste de envelhecimento acelerado, resultando em vigor semelhante ao observado na condição de capacidade de campo (Figura 8). Esse resultado indica que o bioestimulante contribuiu para a preservação da integridade fisiológica das sementes, aumentando sua tolerância ao estresse oxidativo e ao processo de deterioração impostos pela condição de DH durante o desenvolvimento das sementes.

4.2.6. Atividade das enzimas antioxidantes

A atividade das enzimas antioxidantes superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT) e peroxidase (POX) nas sementes foi influenciada pelas condições hídricas e pelo genótipo avaliado (Figura 9). De modo geral, observou-se que o déficit hídrico, isoladamente ou associado à aplicação do bioestimulante à base de algas (DH+Bio), promoveu alterações na atividade dessas enzimas, evidenciando a ativação de mecanismos antioxidantes relacionados à proteção contra o estresse oxidativo durante a formação e maturação das sementes

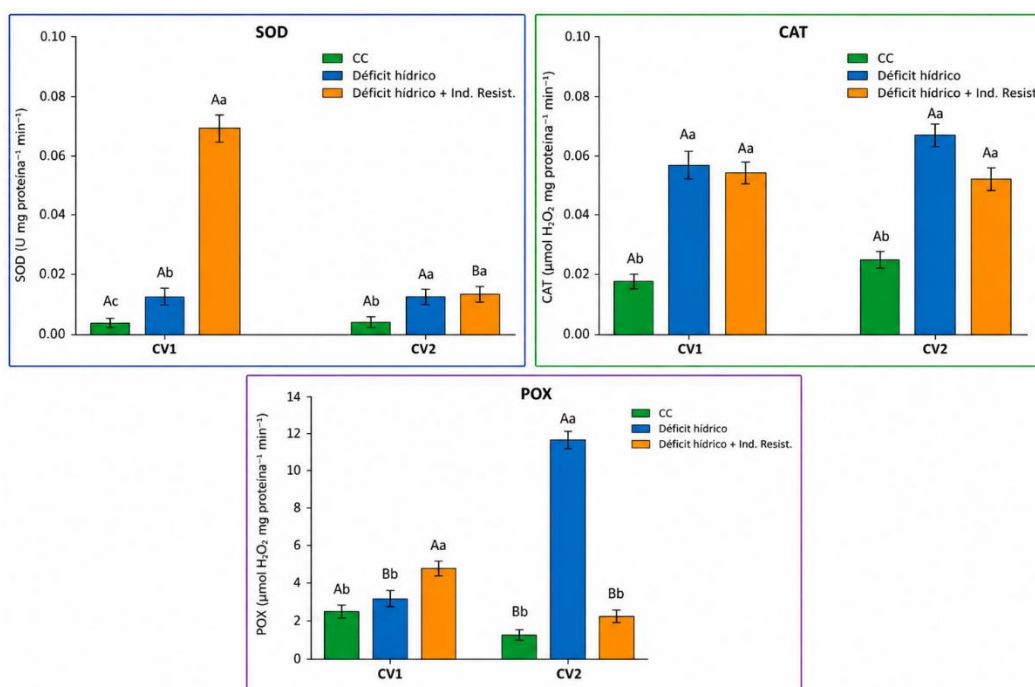


Figura 9. Atividade das enzimas superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT) e peroxidase (POX) em sementes de soja obtidas de plantas submetidas aos tratamentos controle (CC), déficit hídrico (DH) e déficit hídrico associado à aplicação de indutor de resistência (DH+Bio), nas cultivares CV1 e CV2. As barras representam a média $\pm$ erro-padrão da média. Letras minúsculas iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$), comparando os tratamentos dentro de cada cultivar. Letras maiúsculas iguais não diferem entre si pelo teste F ($p < 0,05$), comparando as cultivares dentro de cada tratamento.

A atividade das enzimas antioxidantes nas sementes de soja foi influenciada tanto pelas condições hídricas quanto pelo genótipo avaliado (Figura 9). Para a atividade da superóxido dismutase (SOD) (Figura 9A), observou-se resposta distinta entre as cultivares. Na cultivar CV1, a menor atividade foi registrada no tratamento controle (CC), sem diferir significativamente do déficit hídrico (DH). Entretanto, a associação do déficit hídrico com a aplicação do bioestimulante à base de alga (DH+Bio) promoveu aumento expressivo da atividade da SOD em relação aos demais tratamentos. Esse resultado sugere que a intensificação

da formação do radical superóxido (O_2^-) desencadeou a ativação desse primeiro mecanismo de defesa antioxidante. Em contraste, para a cultivar CV2, não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos.

Ao comparar as cultivares dentro de cada tratamento, verificou-se que a atividade da SOD foi superior na cultivar CV1 apenas sob DH+ BIO. A SOD é reconhecida como a primeira linha de defesa antioxidante em plantas submetidas ao estresse hídrico, sendo responsável pela conversão do radical superóxido (O_2^-) em peróxido de hidrogênio (H_2O_2), desempenhando papel central na proteção celular durante condições de estresse abiótico (MITTLER, 2002). Assim, para a cultivar CV1, a aplicação do bioestimulante à base de alga resultou em elevação da atividade da SOD em relação ao déficit hídrico isolado, indicando que o produto pode ter estimulado preventivamente o sistema antioxidante, preparando as sementes para responder ao aumento da carga oxidativa.

A atividade da catalase (CAT) também foi afetada pelas condições de estresse (Figura 9B). Em ambas as cultivares, observou-se menor atividade da enzima no tratamento controle, enquanto os tratamentos DH e DH+ BIO apresentaram maiores valores, sem diferenças significativas entre si. Esses resultados indicam que o déficit hídrico estimulou a atividade da CAT, comportamento semelhante ao observado para a SOD. Na comparação entre cultivares, diferença significativa foi observada apenas no tratamento controle, no qual a cultivar CV2 apresentou atividade superior à CV1.

A CAT exerce papel fundamental na manutenção da viabilidade das sementes durante o armazenamento e nos estágios iniciais da germinação, atuando na remoção do H_2O_2 acumulado durante a dessecação e o envelhecimento (WALTERS et al., 2010). Dessa forma, o aumento da atividade dessa enzima em condições de déficit hídrico evidencia a necessidade de maior remoção de espécies reativas de oxigênio (EROs) geradas sob estresse. Além disso, elevada atividade basal de CAT pode indicar maior estresse oxidativo endógeno, enquanto a manutenção ou recuperação dessa atividade mediante o uso de indutores sugere melhoria do equilíbrio redox celular (BAILLY et al., 2008). Estudos recentes em sementes de soja demonstram que a modulação da CAT está associada ao aumento do vigor e da tolerância ao envelhecimento acelerado, reforçando sua importância como indicador fisiológico da qualidade das sementes (PEREIRA et al., 2021).

Para a atividade da peroxidase (POX) (Figura 9C), observou-se interação entre genótipo e tratamento. Na cultivar CV1 não houve diferença significativa entre os tratamentos. Já na cultivar CV2, a maior atividade foi observada sob déficit hídrico (DH), seguida pelos

tratamentos DH+BIO e controle (CC), evidenciando forte resposta antioxidante induzida pelo estresse hídrico. Na comparação entre cultivares, verificou-se maior atividade da POX na cultivar CV2 sob DH e DH+BIO, enquanto no tratamento controle a cultivar CV1 apresentou atividade superior.

A POX está diretamente relacionada à proteção contra danos oxidativos acumulados durante o enchimento e a maturação das sementes, influenciando o vigor e a longevidade (BAILLY, 2004). Dessa forma, a maior atividade observada na cultivar CV2 sob déficit hídrico sugere maior mobilização desse mecanismo antioxidante para manutenção da integridade celular em condições adversas.

De maneira geral, os resultados demonstram que o déficit hídrico imposto às plantas de soja entre os estádios R5 e R7 promoveu alterações importantes no sistema antioxidante das sementes, independentemente da cultivar. Tanto o déficit hídrico isolado quanto sua associação ao bioestimulante estimularam a atividade das enzimas SOD e CAT em relação ao controle. Para a POX, contudo, as respostas foram dependentes do genótipo, evidenciando diferenças na estratégia antioxidante adotada por cada cultivar.

Os resultados reforçam a ativação de mecanismos antioxidantes em resposta ao estresse hídrico, conforme amplamente descrito para plantas submetidas a condições de estresse abiótico (MITTLER, 2002; HASANUZZAMAN et al., 2020). Destaca-se que a cultivar CV1 apresentou resposta mais evidente ao tratamento DH+BIO, especialmente pelo aumento da atividade da SOD, indicando possível ação do bioestimulante à base de algas como indutor de tolerância ao déficit hídrico.

Bioestimulantes formulados a partir de extratos de algas marrons, como *Ascophyllum nodosum*, contêm hormônios vegetais, incluindo auxinas, citocininas e giberelinas, além de compostos antioxidantes e polissacarídeos que atuam diretamente na regulação metabólica, no desenvolvimento radicular e no crescimento vegetal (KAPOORE et al., 2021). Esses compostos podem aumentar a resistência das plantas a condições adversas por meio da atenuação dos danos oxidativos, da eliminação de EROs, do estímulo à síntese de antioxidantes enzimáticos e da melhoria da eficiência fotossintética (MARIANI et al., 2017; SANTANIELLO et al., 2017; SHARMA et al., 2019).

Segundo Kapoore et al. (2021), os extratos de algas atuam como importantes moduladores fisiológicos da resposta ao estresse, sendo que alguns estudos relatam aumento da atividade de enzimas antioxidantes, especialmente SOD e CAT, em plantas submetidas a condições adversas (SANTANIELLO et al., 2017; MUGHUNTH et al., 2024). Assim, os

resultados obtidos evidenciam que a resposta ao déficit hídrico em soja envolve uma complexa interação entre genótipo e mecanismos antioxidantes, sendo que a aplicação do bioestimulante à base de algas pode atuar como ferramenta complementar no manejo da tolerância ao estresse hídrico, com efeitos mais pronunciados em genótipos responsivos, como a cultivar CV1.

4.2.7. Índice e fluorescência de clorofila *a*

Sementes provenientes do cultivar CV1 apresentam, em geral, maior índice de clorofila *a* mas com menor fluorescência em relação ao cultivar CV2 (Figura 10). Independente do genótipo, o conteúdo de clorofila *a* e sua fluorescência, aumentam em sementes produzidas na condição de DH ainda que haja aplicação de bioestimulante associada (DH + BIO) (Figura 10).

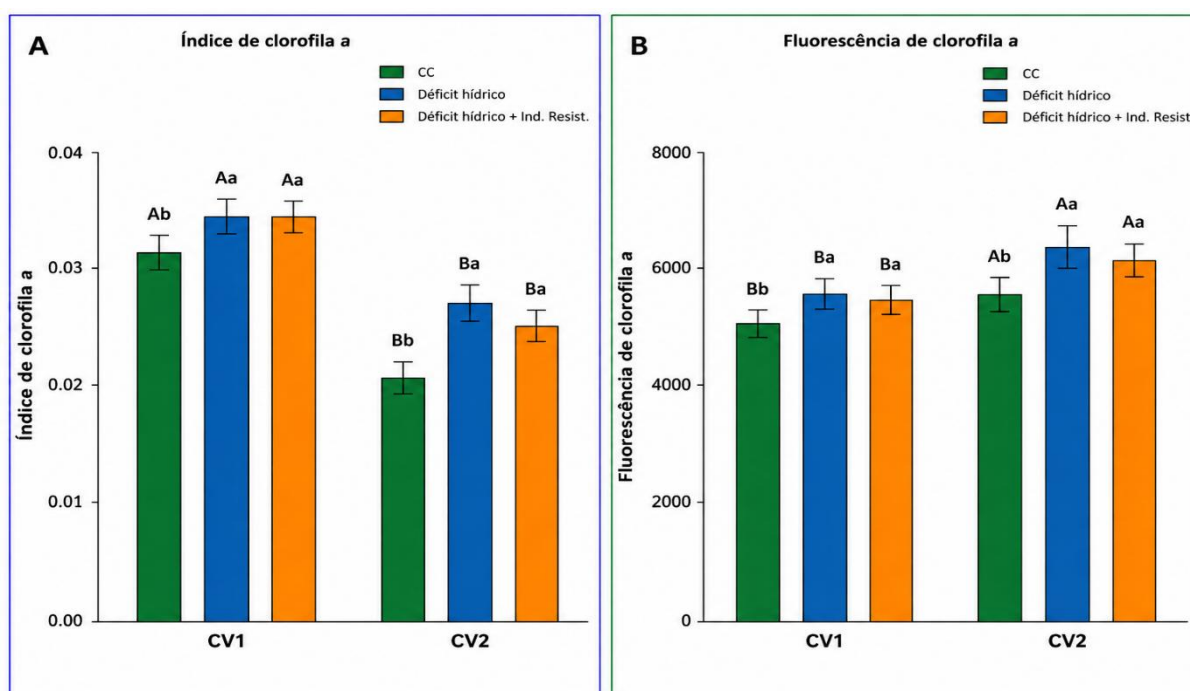


Figura 10. Índice de clorofila *a* (A) e Fluorescência de clorofila *a* (B) em sementes de soja obtidas de plantas submetidas aos tratamentos C (controle), DH (déficit hídrico) e DH+BIO (déficit hídrico + bioestimulante à base de algas). Letras minúsculas iguais não diferem pelo teste de Tukey ($p < 0,05$) e comparam tratamentos dentro de cada cultivar. Letras maiúsculas iguais não diferem pelo teste F ($p < 0,05$) e comparam cultivares dentro de cada tratamento.

A clorofila *a* residual é utilizada como indicativo da maturidade fisiológica em sementes de soja, uma vez que os sinais de fluorescência das clorofilas decrescem conforme a maturação progride (BATISTA et al., 2022). Alterações nesse processo estão frequentemente associadas a condições de estresse durante o enchimento e a maturação das sementes, levando a expressão

do esverdeamento por meio da retenção de clorofila (TEIXEIRA et al., 2016), o que pode ser detectado pelos sinais da fluorescência e conteúdo de clorofila *a* (BATISTA et al., 2022; PETRONILIO et al., 2025). Tão logo, a técnica pode ser utilizada para triagem de sementes com retenção de clorofila (Figura 10).

A anomalia do esverdeamento, leva a redução do potencial fisiológico das sementes de soja (AJALA-Luccas et al., 2023); o que foi verificado no presente estudo, em que a condição de DH elevou os níveis do conteúdo e fluorescência de clorofila *a* (Figura 10), com uma marcante redução da qualidade associada (Figura 5). É importante verificar que o emprego do bioestimulante à base de extrato de algas nas plantas que passaram pelo déficit hídrico durante o enchimento e maturação (DH + BIO), não foi capaz de reverter o acúmulo residual das clorofilas imposto pela condição de DH (Figura 10), o que pode ter ocorrido por duas razões principais: (i) existe uma prevalência da expressão da anomalia do esverdeamento na condição estressante a planta-mãe, dado a susceptibilidade genotípica; e (ii) a cobertura da “proteção” às condições estressante a planta-mãe possibilitada pelo bioestimulante foi insuficiente para atenuar os níveis residuais nas sementes produzidas nesta condição, o que pode ser analisado em pesquisas futuras.

Por fim, vale salientar que em condição de capacidade de campo (C), aqui reportado a como um análogo a condição ideal de campo, a cultivar 67168RSF CV1 apresentou menores conteúdos e fluorescência de clorofila *a* comparada a cultivar 660 CV2 (Figura 10), indicando que de maneira inata, este cultivar apresentar maior conteúdo deste pigmento fotossintético em seus tecidos. Assim, o uso de bioindutores de resistência pode se constituir como estratégia complementar de manejo da cultura em campo, favorecendo o desempenho de genótipos mais sensíveis, especialmente sob condições de déficit hídrico.

5. CONCLUSÕES

O déficit hídrico compromete o desempenho fisiológico e a qualidade fisiológica das sementes de soja, reduzindo a atividade metabólica relacionada à germinação, ao vigor e ao crescimento inicial das plântulas. Além disso, o estresse hídrico promove alterações no sistema antioxidante das plantas, evidenciadas pelo aumento da atividade das enzimas SOD e CAT.

A aplicação do bioestimulante à base de *Ascophyllum nodosum* atenua os efeitos negativos do déficit hídrico em ambas as cultivares avaliadas, contribuindo para a manutenção do equilíbrio antioxidante e favorecendo a qualidade fisiológica das sementes. Como

consequência, observa-se melhoria na germinação, no vigor e no crescimento das plântulas, demonstrando o potencial do bioestimulante como ferramenta para reduzir os impactos do estresse hídrico sobre a cultura da soja.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AJALA-LUCCAS, D.; RIBEIRO-OLIVEIRA, J. P.; TEIXEIRA, R. N.; DUCATTI, K. R.; FRANÇA-NETO, J. B.; HILHORST, H. W. M.; DA SILVA, E. A. A. The seed–seedling transition in commercial soybean cultivars with the presence of greenish seeds in the sample: a perspective from classical genetic parameters. *Agronomy*, v. 13, p. 1966, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy13081966>.

ALMAKAS, Aisha et al. Enhancing soybean germination and vigor under water stress: the efficacy of bio-priming with sodium carboxymethyl cellulose and gum arabic. *Frontiers in plant science*, v. 15, p. 1475148, 2025.

ANDERSON, M. D.; PRASAD, T. K.; STEWART, C. R. Changes in isozyme profiles of catalase, peroxidase, and glutathione reductase during acclimation to chilling in mesocotyls of maize seedlings. *Plant Physiology*, v. 109, n. 4, p. 1247–1257, 1995. DOI: 10.1104/pp.109.4.1247.

APEL, K.; HIRT, H. Reactive oxygen species: metabolism, oxidative stress, and signal transduction. *Annual Review of Plant Biology*, v. 55, p. 373–399, 2004. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.55.031903.141701>

APPIAH, Ebenezer Ayew et al. Role of Biostimulants in Sustainable Soybean (*Glycine max* L.) Production: A Systematic Review. *Sustainability*, v. 18, n. 2, p. 636, 2026. <https://doi.org/10.3390/su18020636>

ARTUZO, F. D.; FOGUESATTO, C. R.; SOUZA, Â. R. L. D.; SILVA, L. X. D. Gestão de custos na produção de milho e soja. *Revista Brasileira de Gestão de Negócios*, v. 20, n. 2, p. 273–294, 2018. DOI: 10.7819/rbgn.v20i2.3192.

BAILLY, C. Active oxygen species and antioxidants in seed biology. *Seed Science Research*, v. 14, n. 2, p. 93–107, 2004. <https://doi.org/10.1079/SSR2004159>

BAILLY, C.; EL-MAAROUF-BOUTEAU, H.; CORBINEAU, F. From intracellular signaling networks to cell death: the dual role of reactive oxygen species in seed physiology. *Comptes Rendus Biologies*, v. 331, n. 10, p. 806–814, 2008. [10.1016/j.crv.2008.07.022](https://doi.org/10.1016/j.crv.2008.07.022)

BATISTA, T. B.; MASTRANGELO, C. B.; DE MEDEIROS, A. D.; PETRONILIO, A. C. P.;

FONSECA DE OLIVEIRA, G. R.; DOS SANTOS, I. L.; CRUSCIOL, C. A. C.; AMARAL DA SILVA, E. A. A reliable method to recognize soybean seed maturation stages based on autofluorescence-spectral imaging combined with machine learning algorithms. *Frontiers in Plant Science*, v. 13, p. 914287, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.914287>.

BEAUCHAMP, C.; FRIDOVICH, I. Superoxide dismutase: improved assays and an assay applicable to acrylamide gels. *Analytical Biochemistry*, v. 44, n. 1, p. 276–287, 1971. DOI: 10.1016/0003-2697(71)90370-8.

BOUTAHIRI, S.; BENRKIA, R.; TEMBENI, B.; IDOWU, O. E.; OLATUNJI, O. J. Effect of biostimulants on the chemical profile of food crops under normal and abiotic stress conditions. *Current Plant Biology*, v. 40, p. 100410, 2024. DOI: 10.1016/j.cpb.2024.100410.

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

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. *Regras para análise de sementes*. Brasília: MAPA/ACS, 2009. 395 p.

BURNER, Nathaniel et al. Drought tolerance in soybean: genetics, metabolomics, remote sensing, and breeding for enhanced drought tolerance. *Frontiers in Plant Science*, v. 17, p. 1733525, 2026.

CARVALHO, N. M.; NAKAGAWA, J. *Sementes: ciência, tecnologia e produção*. 5. ed. Jaboticabal: FUNEP, 2012.

CHANCE, B.; MAEHLY, A. C. Assay of catalases and peroxidases. In: *Methods in Enzymology*, v. 2, p. 764–775, 1955.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). *Acompanhamento da safra brasileira de grãos: safra 2024/25, levantamento n.º 11*. Brasília: CONAB, ago. 2025. Disponível em: <https://sna.agr.br/conab-11a-estimativa-da-safra-2024-25-indica-recorde-de-345-23-milhoes-de-toneladas>.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). *Acompanhamento da safra brasileira de grãos*, v. 11, n. 8, safra 2023/24. Brasília, maio 2024.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). *Acompanhamento da safra brasileira de grãos*, v. 12, n. 12, safra 2022/23. Brasília: CONAB, 2023. 31 p.

DORNBOS JÚNIOR, D. L.; MULLEN, R. E. Soybean seed quality as influenced by drought stress during seed fill. *Crop Science*, Madison, v. 29, n. 2, p. 476–480, 1989.

FEHR, W. R.; CAVINESS, C. E. *Stages of soybean development*. Ames: Iowa State University, 1977. 12 p. (Special Report, n. 80).

FERREIRA, Rodrigo Cornacini et al. Soybean yield losses related to drought events in Brazil: Spatial–temporal trends over five decades and management strategies. *Agriculture*, v. 14, n. 12, p. 2144, 2024.

FIALHO, Camila Andrade et al. Respostas antioxidantes e fisiológicas de sementes de cultivares de soja ao atraso de colheita. *Semina: Ciências Agrárias*, v. 43, n. 3, p. 1127-1144, 2022. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2022v43n3p1127>

FINCH-SAVAGE, W. E.; BASSEL, G. W. Seed vigour and crop establishment: extending performance beyond adaptation. *Journal of Experimental Botany*, Oxford, v. 67, n. 3, p. 567–591, 2016. <https://doi.org/10.1093/jxb/erv490>

GIANNOPOLITIS, C. N.; RIES, S. K. Superoxide dismutases I. Occurrence in higher plants. *Plant Physiology*, v. 59, n. 2, p. 309–314, 1977. DOI: 10.1104/pp.59.2.309.

GILL, S. S.; TUTEJA, N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, Paris, v. 48, n. 12, p. 909–930, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2010.08.016>

GITELSON, A. A.; GRITZ, Y.; MERZLYAK, M. N. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. *Journal of Plant Physiology*, v. 160, p. 271–282, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1078/0176-1617-00887>.

GONZÁLEZ-PÉREZ, A. M.; RIVAS-CASTILLO, A. M.; VALDEZ-CALDERÓN, A.; GAYOSSO-MORALES, M. A. Microalgae as biostimulants: a new approach in agriculture. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, v. 38, n. 4, 2022. DOI: 10.1007/s11274-021-03192-2.

GRAHL, T. D. et al. Water deficit stress on the physiological quality of soybean seeds. *Journal of Seed Science*, Londrina, v. 44, e202202, 2022. <https://doi.org/10.1590/2317-1545v44260716>

HASANUZZAMAN, M.; BHUYAN, M. H. M. B.; ZULFIQAR, F.; RAZA, A.; MOHSIN, S. M.; MAHMUD, J. A.; FUJITA, M. Reactive oxygen species and antioxidant defense in plants under abiotic stress. *Antioxidants*, Basel, v. 9, n. 8, p. 681, 2020. <https://doi.org/10.3390/antiox9080681>

KAPOORE, R. V.; WOOD, E. E.; LLEWELLYN, C. A. Algae biostimulants: a critical look at microalgal biostimulants for sustainable agricultural practices. *Biotechnology Advances*, v. 49,

p. 107754, 2021. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2021.107754.

KAR, M.; MISHRA, D. Catalase, peroxidase and polyphenoloxidase activities during rice leaf senescence. *Plant Physiology*, v. 57, n. 2, p. 315–319, 1976. DOI: 10.1104/pp.57.2.315.

KOLLI, S.; BEHERA, B.; P., B. Efficacy of microalgal extracts as biostimulants through seed treatment and foliar spray for tomato cultivation. *Industrial Crops and Products*, v. 151, p. 112453, 2020. DOI: 10.1016/j.indcrop.2020.112453.

LAWLOR, D. W.; TEZARA, W. Causes of decreased photosynthetic rate and metabolic capacity in water-deficient leaf cells. *Plant, Cell & Environment*, Oxford, v. 32, n. 9, p. 1121–1137, 2009. <https://doi.org/10.1093/aob/mcn244>

MACHADO, F. R.; POSSENTI, J. C.; FANO, A.; VISMARA, E. S.; DEUNER, C. Desempenho de sementes de soja em função da época de aplicação de diferentes adubos foliares. *Vivências*, v. 16, n. 31, p. 107–122, 2020. DOI: 10.31512/vivencias.v16i31.217.

MANAVALAN, L. P.; GUTTIKONDA, S. K.; TRAN, L. S. P.; NGUYEN, H. T. Physiological and molecular approaches to improve drought resistance in soybean. *Plant and Cell Physiology*, v. 50, p. 1260–1276, 2009. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcp082>

MARCOS FILHO, J. *Fisiologia de sementes de plantas cultivadas*. 2. ed. Londrina: ABRATES, 2020.

MARIANI, L.; FERRANTE, A. Agronomic management for enhancing plant tolerance to abiotic stresses—drought, salinity, hypoxia, and lodging. *Horticulturae*, v. 3, n. 2, 2017. <https://doi.org/10.3390/horticulturae3040052>

MARTYNENKO, A.; SHOTTON, K.; ASTATKIE, T.; PETRASH, G.; FOWLER, C.; NEILY, W.; CRITCHLEY, A. T. Thermal imaging of soybean response to drought stress: the effect of *Ascophyllum nodosum* seaweed extract. *SpringerPlus*, v. 5, 2016. <https://doi.org/10.1186/s40064-016-3019-2>

MEDEIROS, A. D.; PEREIRA, M. D. SAPL®: um software gratuito para determinação do potencial fisiológico em sementes de soja. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 48, n. 3, p. 222–228, 2018. DOI: 10.1590/1983-40632018v48i3a40.

MITTLER, R. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. *Trends in Plant Science*, Oxford, v. 7, n. 9, p. 405–410, 2002.

MITTLER, R. ROS are good. *Trends in Plant Science*, Oxford, v. 22, n. 1, p. 11–19, 2017.

MUGHUNTH, R. J.; VELMURUGAN, S.; MOHANALAKSHMI, M.; VANITHA, K. A review of seaweed extract's potential as a biostimulant to enhance growth and mitigate stress in

horticulture crops. *Scientia Horticulturae*, v. 334, p. 113312, 2024. DOI: 10.1016/j.scienta.2024.113312.

NEUMAIER, N.; FARIAS, J.R.B.; NEPOMUCENO, A.L.; MERTZ-HENNING, L.M.; FOLONI, J.S.S.; MORAES, L.A.C.; GONÇALVES, S.L. Ecofisiologia da soja. In: JUNIOR, A.A.B.; SEIXAS, C.D.S.; KRZYZANOWSKI, F.C.; NEUMAIER, N.; LEITE, R.M.V.B.C. Tecnologias de produção de soja. Londrina: Embrapa Soja, 2020.

PEIXOTO, P. H. P.; CAMBRAIA, J.; SANT'ANNA, R.; MOSQUIM, P. R.; MOREIRA, M. A. Aluminum effects on lipid peroxidation and on the activities of enzymes of oxidative metabolism in sorghum. *Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal*, v. 11, n. 3, p. 137–143, 1999.

PETER, Odongkara et al. Combined application of melatonin and *Bacillus* sp. strain IPR-4 ameliorates drought stress tolerance via hormonal, antioxidant, and physiomolecular signaling in soybean. *Frontiers in Plant Science*, v. 15, p. 1274964, 2024. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1274964>

PETRONILIO, A. C. P.; MASTRANGELO, C. B.; BATISTA, T. B.; FONSECA DE OLIVEIRA, G. R.; SANTOS, I. L.; AMARAL DA SILVA, E. A. Smart and accurate: a new tool to identify stressed soybean seeds based on multispectral images and machine learning models. *Smart Agriculture Technology*, v. 12, p. 101042, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.101042>.

PRAJAPATI, Sunil Kumar et al. The plant bio-stimulant properties of seaweed extracts: potential to mitigate climate change for sustainable agriculture. *Food Sci. Rep*, v. 4, p. 70-75, 2023.. DOI: 10.3390/plants10030531.

R CORE TEAM. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2018.

SANTANIELLO, A., SCARTAZZA, A., GRESTA, F., LORETI, E., BIASONE, A., DI TOMMASO, D., ... & PERATA, P. *Ascophyllum nodosum* seaweed extract alleviates drought stress in *Arabidopsis* by affecting photosynthetic performance and related gene expression. *Frontiers in plant science*, v. 8, p. 1362, 2017. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01362>

SEDIYAMA, TUNEO; SILVA, FELIPE; BORÉM, ALUÍZIO. Soja: do plantio à colheita. Viçosa: UFV, p. 333, 2015.

SHUKLA, P. S. et al. Seaweed extract improves drought tolerance of soybean by regulating stress-response genes. *AoB Plants*, v. 10, 2017. DOI: [10.1093/aobpla/plx051](https://doi.org/10.1093/aobpla/plx051).

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

TEIXEIRA, R. N.; LIGTERINK, W.; FRANÇA-NETO, J. B.; HILHORST, H. W.; DA SILVA, E. A. A. Gene expression profiling of the green seed problem in soybean. *BMC Plant Biology*, v. 16, p. 37, 2016. DOI: [10.1186/s12870-016-0729-0](https://doi.org/10.1186/s12870-016-0729-0)

WALTERS, C.; BALLESTEROS, D.; VERTUCCI, V. A. Structural mechanics of seed deterioration: standing the test of time. *Plant Science*, Amsterdam, v. 179, n. 6, p. 565–573, 2010. DOI: [10.1016/j.plantsci.2010.06.016](https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2010.06.016)

WANG, Yongqiang et al. PEG-6000 priming improves aged soybean seed vigor via carbon metabolism, ROS scavenging, hormone signaling, and lignin synthesis regulation. *Agronomy*, v. 13, n. 12, p. 3021, 2023. <https://doi.org/10.3390/agronomy13123021>

YOU, J.; CHAN, Z. ROS regulation during abiotic stress responses in crop plants. *Frontiers in Plant Science*, v. 6, 2015. DOI: 10.3389/fpls.2015.01092.