



PAULO FÉLIX BENTO

**CONDICIONAMENTO COM PERÓXIDO DE HIDROGÊNIO
EM SEMENTES DE *Corymbia citriodora***

LAVRAS – MG

2026

PAULO FÉLIX BENTO

**CONDICIONAMENTO COM PERÓXIDO DE HIDROGÊNIO
EM SEMENTES DE *Corymbia citriodora***

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, área de concentração em Ciências Florestais, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Anderson Cleiton José

Orientador

Prof. Dr. José Marcio Rocha Faria

Coorientador

LAVRAS – MG

2026

**Ficha Catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração
de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA, com
dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Bento, Paulo Félix.

Condicionamento com peróxido de hidrogênio em sementes de *Corymbia citriodora* / Paulo Félix Bento. - 2026.

57 p.

Orientador: Anderson Cleiton José

Coorientador: José Marcio Rocha Faria

Dissertação (Mestrado Acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2026.
Bibliografia.

1. *Corymbia citriodora*. 2. Condicionamento. 3. Estresse salino. I. Cleiton José, Anderson. II. Rocha Faria, José Marcio. III. Universidade Federal de Lavras. IV. Título.

PAULO FÉLIX BENTO

**CONDICIONAMENTO COM PERÓXIDO DE HIDROGÊNIO
EM SEMENTES DE *Corymbia citriodora***

**HYDROGEN PEROXIDE PRIMING OF *CORYMBIA CITRIODORA*
SEEDS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, área de concentração em Ciências Florestais, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADO em 04 de fevereiro de 2026.

Dra. Marcela Carlota Nery

UFLA

Dr. Wilson Vicente Souza Pereira

UFPI

Prof. Dr. Anderson Cleiton José

Orientador

Prof. Dr. José Marcio Rocha Faria

Coorientador

LAVRAS – MG

2026

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, meu amparo constante e fonte inesgotável de sabedoria, pela força nos momentos de fraqueza, pela serenidade diante dos desafios e pela graça que me permitiu perseverar até a conclusão desta etapa tão significativa da minha vida acadêmica.

Agradeço, com profundo amor e gratidão, à minha família, especialmente aos meus pais, **Josefina das Dores Félix** e **José Gedalvo Assunção**, pilares da minha formação humana e espiritual, cujo apoio incondicional, ensinamentos, orações e incentivo permanente foram essenciais para que este sonho se tornasse realidade.

Ao **Prof. Dr. Anderson Cleiton José**, agradeço a orientação, dedicação, confiança, paciência e generosa partilha de conhecimentos, fundamentais para o desenvolvimento e a consolidação deste trabalho.

Agradeço, ainda, a todos os familiares e pessoas queridas que, mesmo à distância, estiveram presentes por meio de palavras de encorajamento, gestos de carinho e confiança, fortalecendo-me nos momentos mais desafiadores e celebrando comigo cada conquista alcançada.

“This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Finance Code 001”

RESUMO

O *Corymbia citriodora*, é uma espécie de grande importância para o setor florestal brasileiro, comumente cultivada em diferentes solos e regiões, com baixo nutriente e recursos hídrico, no entanto. Estresses abióticos como a salinidade representa uma ameaça crescente à sua germinação, estabelecimento e produtividade. Portanto, o presente estudo investigou o potencial do peróxido de hidrogênio (H_2O_2) como agente de condicionamento osmótico, para melhorar os índices de germinação, as características das plântulas e a tolerância à salinidade no *C. citriodora*. O experimento foi conduzido em condições controladas, utilizando delineamento experimental inteiramente casualizado, em esquema fatorial, com cinco repetições de vinte sementes. Sementes foram pré-tratadas em H_2O_2 (0, 100, 200 e 400 mM). As plântulas foram cultivadas por 14 em condições controle (0) e germinadas sob estresse induzido por cloreto de sódio (NaCl) (0, 75 e 150 mM). O estresse salino inibiu significativamente ($P < 0,05$), o percentual de germinação, o índice de vigor das sementes, comprimento radicular e teor de clorofila. Por outro lado, sementes pré-tratadas melhoraram significativamente ($P < 0,05$) com aceleração da germinação, os índices de vigor das sementes e comprimento da raiz e conteúdo de antocianinas. Dada a resposta germinativa uniforme entre as doses de H_2O_2 a dose de 100 mM e hidrocondicionamento para isolar o efeito do H_2O_2 , foi selecionada para o estudo bioquímico sob esquema fatorial (2 agentes condicionantes \times 4 tempos de embebição + controle). Ambos os condicionamentos não foram capazes de induzir de forma superexpressão de enzimas antioxidantes (SOD, CAT, APX) e diminuir a peroxidação lipídica (MDA). Por outro lado, os agentes condicionantes foram eficientes em reduzir os níveis endógenos de H_2O_2 , indicando que o efeito protetor advém de um ajuste fino do estado redox.

Palavras-chave: Homeostase iônica; Condicionamento químico; Estresse oxidativo; Tolerância à salinidade.

ABSTRACT

Corymbia citriodora is a species of great importance to the Brazilian forestry sector, commonly cultivated across different soils and regions, even those with low nutrients and water resources. However, abiotic stresses such as salinity represent a growing threat to its germination, establishment, and productivity. Therefore, the present study investigated the potential of hydrogen peroxide (H_2O_2) as an osmotic priming agent to improve germination rates, seedling characteristics, and salinity tolerance in *C. citriodora*. The experiment was conducted under controlled conditions using a completely randomized design in a factorial scheme, with five replicates of twenty seeds. Seeds were pre-treated with H_2O_2 (0, 100, 200, and 400 mM). Seedlings were grown for 14 days under control conditions (0) and germinated under stress induced by sodium chloride (NaCl) (0, 75, and 150 mM). Salt stress significantly inhibited ($P < 0.05$) the germination percentage, seed vigor index, root length, and chlorophyll content. Conversely, pre-treated seeds showed significant improvement ($P < 0.05$) in germination speed, seed vigor indices, root length, and anthocyanin content. Given the uniform germinative response among H_2O_2 doses, the 100 mM dose and hydropriming (to isolate the H_2O_2 effect) were selected for the biochemical study under a factorial scheme (2 priming agents \times 4 soaking times + control). Neither priming treatment was able to induce over-expression of antioxidant enzymes (SOD, CAT, APX) or decrease lipid peroxidation (MDA). On the other hand, the priming agents were efficient in reducing endogenous H_2O_2 levels, indicating that the protective effect stems from a fine-tuning of the redox state

Keywords: Ionic homeostasis; Chemical priming; Oxidative stress; Salt tolerance.

INDICADORES DE IMPACTO

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a eficácia do condicionamento de sementes com peróxido de hidrogênio (H_2O_2) na mitigação do estresse salino em *Corymbia citriodora*, visando otimizar a produção de mudas e garantir o estabelecimento inicial em condições adversas. Os resultados obtidos apresentam impactos econômicos e tecnológicos relevantes para o setor florestal, uma vez que fornecem subsídios para o desenvolvimento de protocolos de condicionamento de baixo custo e alta eficiência. A aceleração da germinação e o vigor radicular observados após o condicionamento podem contribuir para a redução do tempo de permanência das mudas no viveiro e diminuir as taxas de mortalidade no campo, aumentando a rentabilidade dos plantios comerciais voltados para madeira e óleos essenciais. Em termos tecnológicos, o estudo elucidou mecanismos fisiológicos de tolerância, demonstrando que o ajuste fino da homeostase redox é mais determinante que a superexpressão enzimática, o que permite direcionar futuros programas de melhoramento genético e manejo de estresses abióticos. Do ponto de vista ambiental e social, a validação de técnicas que viabilizam o cultivo em solos salinizados é estratégica para a recuperação de áreas degradadas e para a expansão da fronteira florestal sem competir com áreas de produção de alimentos. O caráter extensionista reside na simplicidade da técnica de condicionamento utilizando peróxido de hidrogênio, passível de adoção por viveiristas de diferentes escalas tecnológicas. Os impactos do estudo alinham-se aos objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS) da ONU, especialmente o ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis), ao otimizar insumos na produção de mudas; ODS 13 (Ação contra a Mudança Global do Clima), pelo potencial de reflorestamento em áreas afetadas por salinidade; e ODS 15 (Vida Terrestre), contribuindo para o manejo sustentável de florestas e recuperação de solos degradados.

IMPACT INDICATORS

The present study aimed to evaluate the effectiveness of seed conditioning with hydrogen peroxide (H₂O₂) in mitigating salt stress in *Corymbia citriodora*, with the goal of optimizing seedling production and ensuring successful early establishment under adverse conditions. The results obtained present relevant economic and technological impacts for the forestry sector, as they provide a scientific basis for the development of low-cost and highly efficient priming protocols. The acceleration of germination and the enhanced root vigor observed contribute to reducing the time seedlings remain in nurseries and to lowering field mortality rates, thereby increasing the profitability of commercial plantations aimed at wood and essential oil production. From a technological perspective, this study elucidates physiological mechanisms of tolerance, demonstrating that fine regulation of redox homeostasis is more determinant than enzymatic overexpression, allowing future genetic improvement programs and abiotic stress management strategies to be more effectively targeted. From an environmental and social standpoint, the validation of techniques that enable cultivation in saline soils is strategic for the rehabilitation of degraded areas and for the expansion of the forestry frontier without competing with food production areas. The extension-oriented nature of this work lies in the simplicity of the hydrogen peroxide technique, which can be readily adopted by nursery operators across different technological scales. The impacts of this study are aligned with the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs), particularly SDG 12 (Responsible Consumption and Production), by optimizing inputs in seedling production; SDG 13 (Climate Action), due to the potential for reforestation in salinity-affected areas; and SDG 15 (Life on Land), contributing to sustainable forest management and the restoration of degraded soils.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Gráfico do efeito do condicionamento com H₂O₂ e estresse salino no comprimento radicular de *Corymbia citriodora*..... 41
- Figura 2.** Eficácia comparativa do condicionamento com H₂O₂ na mitigação do estresse salino durante o estabelecimento inicial de plântulas de *Corymbia citriodora*.....43
- Figura 3.** Gráficos das atividades das enzimas antioxidantes SOD (A), APX (B) e CAT (C), peroxidação lipídica (MDA) (D) e H₂O₂ endógeno (E) em sementes condicionadas de *C. citriodora*. 46

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1.** Efeitos do peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e cloreto de sódio (NaCl) na germinação, tempo médio de germinação, índice de velocidade de germinação e T50% de sementes de *C. citriodora*.....41
- Tabela 2.** Gráficos do efeito do peróxido de hidrogênio H_2O_2 e estresse salino no teor de pigmentos em plântulas de *C. citriodora*. (A) clorofila *a*, (B) clorofila *b*, (C) carotenoides, (D) relação clorofila *a/b* e (E) Antocianinas.....44

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1 <i>CORYMBIA CITRIODORA</i>	14
2.2 GERMINAÇÃO	15
2.3 VIGOR DE SEMENTES	17
2.4 CONDICIONAMENTO FISIOLÓGICO	19
2.5 EFEITO DA SALINIDADE NAS PLANTAS	20
2.5 MECANISMOS DO CONDICIONAMENTO COM PERÓXIDO DE HIDROGÊNIO (H ₂ O ₂) EM PLANTAS	21
2.6 ENZIMAS DO SISTEMA ANTIOXIDANTE	23
REFERÊNCIAS	24
ARTIGO 1	35
2. MATERIAL E MÉTODOS	37
2.1 LOCAL DO ESTUDO E MATERIAL VEGETAL	37
2.2 DESENHO EXPERIMENTAL	37
2.3 PREPARAÇÃO DAS SEMENTES E ESTRESSE SALINO	37
2.4 TESTE DE GERMINAÇÃO	38
2.4 COMPRIMENTO DA RAIZ	38
2.6 PIGMENTOS FOTOSSINTÉTICOS E ANTOCIANINAS	38
2.7 ATIVIDADE ENZIMÁTICA, PEROXIDAÇÃO LIPÍDICA E PERÓXIDO DE HIDROGÊNIO	39
3. RESULTADOS	41
3.1 GERMINAÇÃO DE SEMENTES DE <i>CORYMBIA CITRIODORA</i>	41
3.2 COMPRIMENTO DA RAIZ	42
3.3 TEOR DE PIGMENTOS FOTOSSINTÉTICOS	43
3.4 ATIVIDADE ENZIMÁTICA, PEROXIDAÇÃO LIPÍDICA E PERÓXIDO DE HIDROGÊNIO	44
4. DISCUSSÃO	46
5. CONCLUSÃO	51
REFERENCIAS	51

PRIMEIRA PARTE

1. INTRODUÇÃO

O *Corymbia citriodora* Hook. (Myrtaceae) é uma espécie originária da Oceania, amplamente distribuída em regiões tropicais devido à qualidade de sua madeira e ao alto valor comercial de seu óleo essencial (Panikar *et al.*, 2022; Rocha *et al.*, 2024). No Brasil, sua vasta difusão deve-se à ampla adaptação edafoclimática e versatilidade industrial, atendendo desde os setores de cosméticos e celulose até a construção civil e energia (Tolba *et al.*, 2015; Win *et al.*, 2024). Para sustentar essa demanda e garantir povoamentos produtivos, o estabelecimento inicial da cultura depende do uso de sementes de alta qualidade fisiológica e sanitária. Essa dependência da via seminal é reforçada pelas limitações na propagação vegetativa da espécie, visto que o enraizamento de estacas apresenta baixas taxas de sucesso, frequentemente próximas a 5% (Lima *et al.*, 2022; Costella *et al.*, 2025).

Nesse cenário, visando otimizar a propagação sexuada desta espécie e maximizar seu desempenho em campo, o condicionamento de sementes (*seed priming*) tem ganhado destaque como uma estratégia eficiente para induzir tolerância a estresses bióticos e abióticos (Ellouzi *et al.*, 2021). Essa abordagem baseia-se na premissa de que as plantas possuem mecanismos para "memorizar" o estresse, gerando uma memória de curto ou longo prazo que lhes permite programar respostas defensivas muito mais eficazes e robustas em exposições subsequentes (Thakur *et al.*, 2020). Tal fenômeno, cuja eficácia já foi relatada em culturas como milho, ervilha e tomate (Gelaw; Sanan-Mishra, 2024; Afzal *et al.*, 2025; Ahammed *et al.*, 2025), pode ser induzido por diversos agentes químicos, dentre os quais se destaca o uso de moléculas sinalizadoras como o peróxido de hidrogênio (Abd Elhady *et al.*, 2021).

Especificamente, o condicionamento químico com peróxido de hidrogênio (H₂O₂) fundamenta-se na capacidade desta molécula de atuar, em baixas concentrações, como um mensageiro secundário crucial (Habib *et al.*, 2020). Embora historicamente associado à toxicidade oxidativa, evidências recentes demonstram que a exposição prévia e controlada ao H₂O₂ induz a reconfiguração metabólica da planta, aumentando sua plasticidade ao estresse (Iqbal *et al.*, 2025). Esse processo ativa mecanismos de defesa latentes, regulando positivamente o sistema antioxidante enzimático, incluindo superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT) e ascorbato peroxidase (APX), e

incrementando o conteúdo de antioxidantes não enzimáticos, como prolina e glutatona, sem causar danos severos aos tecidos (Hasanuzzaman *et al.*, 2022).

Em nível fisiológico e molecular, o H₂O₂ orchestra uma reconfiguração metabólica que favorece a homeostase iônica e a eficiência fotossintética, essenciais para a sobrevivência sob condições adversas (Goharrizi; Ghanaei, 2024). O mecanismo envolve a modulação de transportadores de membrana, como a H⁺ - ATPase, facilitando a regulação osmótica e a manutenção da integridade celular (Silva *et al.*, 2020; Pandey *et al.*, 2021). Além disso, a modulação do sinal redox, das interações hormonais e da atividade gênica, desencadeada pelo H₂O₂, melhora a sinalização do estresse e reconecta os tecidos fotossintéticos com os tecidos metabólicos. Isso consolida a plasticidade adaptativa da planta, aprimorando seu desempenho frente ao estresse (Iqbal *et al.*, 2025).

Apesar dos avanços na compreensão dos efeitos do H₂O₂ em culturas agrícolas anuais, há uma escassez de informações sobre a aplicação dessa tecnologia como método de condicionamento em espécies florestais. Diante do exposto, o presente estudo teve como objetivo avaliar o efeito do condicionamento com peróxido de hidrogênio (H₂O₂) no desempenho fisiológico de sementes e no vigor inicial de plântulas de *Corymbia citriodora*.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 *Corymbia citriodora*

O *Corymbia citriodora* Hook. é uma espécie nativa da Austrália, pertencente à família Myrtaceae, com altura variando entre 15 e 30 metros, tronco reto e casca lisa e decídua, que pode apresentar coloração cinza, branca ou rosada e sua morfologia da casca e da copa pode variar de acordo com a procedência: plantas de origem norte tendem a apresentar casca rosada, enquanto as de origem sul costumam exibir manchas na casca e copa mais espalhada (Boland *et al.*, 1994). Essa espécie demonstra grande adaptabilidade, ocorrendo em diversos tipos de solo e em florestas abertas (Vitti; Brito, 2003).

Amplamente cultivado em regiões tropicais e subtropicais (Siramon *et al.* 2013), o *C. citriodora* é altamente valorizado por suas diversas aplicações. Devido à alta densidade de sua madeira, é destinada para confecção de cercas, construções rurais e postes, fabricação de móveis e para a construção civil (Brawner *et al.* 2012). No entanto,

a extração de óleos essenciais, que possuem propriedades antioxidantes e antifúngicas (Tolba *et al.* 2015), representa uma das principais finalidades do cultivo dessa espécie em países como Austrália, Brasil, China e Colômbia (Insuan; Chahomchuen, 2020).

No Brasil, o *C. citriodora* foi recomendado para reflorestamentos em vastas áreas, abrangendo praticamente toda a região central, o norte do Paraná, São Paulo, Minas Gerais e o litoral (Golfari *et al.* 1978). Essa recomendação se justifica pelas qualidades silviculturais da espécie e pela alta qualidade de sua madeira, que a torna versátil para múltiplos usos (Lorenzi *et al.* 2003).

2.2 Germinação

A germinação é o processo que se inicia com a absorção de água pela semente e é concluído quando a ponta da radícula se torna visível (Schiltz *et al.*, 2015). Esse processo envolve eventos como a absorção de água, que resulta na expansão e no alongamento do embrião por meio da síntese de proteínas, alterações nas estruturas subcelulares, respiração e síntese de macromoléculas (Miransari; Smith, 2014).

Fatores abióticos, como a disponibilidade de água, oxigênio, luz, temperatura e produtos químicos, influenciam o estabelecimento e a sobrevivência das plântulas. Fatores bióticos, como a microbiota da semente e a microbiota do solo, também podem afetar a germinação (Bewley *et al.*, 2013; O'brien *et al.*, 2021).

Durante a germinação, a absorção de água pela semente ocorre em três fases. A primeira fase é marcada por uma rápida absorção de água devido a mecanismos físicos promovidos pela diferença de potencial hídrico, desencadeando uma reconfiguração estrutural das membranas celulares com a hidratação completa dos conteúdos celulares e a reativação do metabolismo (Nonogaki *et al.* 2010; Sanchez *et al.*, 2019; Kaur; Prasad, 2023). Nesse estágio, observa-se o aumento da atividade respiratória, maior consumo de O₂, hidratação de enzimas mitocondriais, síntese de proteínas e reorganização de aminoácidos (Nogueira *et al.*, 2024). Esses sinais indicam a reativação do metabolismo, acompanhada pela liberação de energia e pela síntese de proteínas a partir do RNAm armazenado no final da fase de maturação (Marcos Filho, 2005).

Na segunda fase, a velocidade de absorção de água estabiliza, pois as sementes atingem o estado de equilíbrio hídrico (Bewley *et al.*, 2013). Segundo Marcos Filho (2005), essa estabilização ocorre devido ao baixo número de mitocôndrias, o que retarda

a ativação da via do glicogênio. Além disso, o tegumento e outras estruturas ao redor da semente limitam a absorção de O₂ pelo embrião ou pelos tecidos de reserva (Bewley *et al.*, 2013). Nessa fase, ocorre a quebra de componentes de reserva em moléculas simples (Kaur; Prasad, 2023), além do aumento da atividade metabólica, transcrição de novos genes, síntese de enzimas, reparo do DNA, multiplicação mitocondrial, tradução ou degradação de mRNAs, mobilização de oligossacarídeos, enfraquecimento do endosperma, biossíntese de fitormônios, crescimento do embrião e ruptura da testa (Bewley *et al.*, 2013; Nogueira *et al.*, 2024).

Já na terceira fase, ocorre uma nova absorção de água devido ao afrouxamento da parede celular, ruptura da testa e do endosperma, divisão mitótica e expansão celular (Nonogaki *et al.*, 2010; Schiltz *et al.*, 2015; Taiz *et al.*, 2017). O alongamento do eixo embrionário, levando à protrusão da radícula e ao estabelecimento da plântula, caracteriza o estágio final da germinação (Weibrecht *et al.*, 2011). Nesse estágio, há aumento na taxa de respiração devido à maior disponibilidade de O₂, síntese de novas mitocôndrias e produção de enzimas responsáveis pela respiração celular, utilização dos tecidos de reserva, mobilização de reservas armazenadas, divisão celular, síntese de DNA, alongamento das células da radícula e biossíntese de amido (Marcos Filho, 2005).

O alongamento da raiz resulta da divisão celular na ponta do sistema radicular, marcando o fim do período de germinação e o início do crescimento da plântula. Esse crescimento é impulsionado pela distensão das paredes celulares do eixo embrionário, localizado entre a capa radicular e a base do hipocótilo (Xu *et al.*, 2022).

Três hipóteses buscam explicar o crescimento inicial da radícula. A primeira sugere que o acúmulo de solutos no final da germinação altera o potencial osmótico das células radiculares, promovendo maior absorção de água, o que, impulsionado pelo turgor, causa a expansão celular (Bewley *et al.*, 2013). A segunda hipótese sugere que o afrouxamento das paredes celulares da radícula, causado pela clivagem e reorganização de moléculas de xiloglucano ligadas às microfibrilas, permite a expansão e o alongamento celular (Bewley, 1997). A terceira hipótese está relacionada ao enfraquecimento dos tecidos circundantes ao embrião, facilitando o crescimento da radícula (Bewley, 1997). Esse enfraquecimento pode ocorrer na camada de endosperma, que, em muitas espécies, impede o crescimento da radícula (Nonogaki *et al.*, 2010).

As espécies reativas de oxigênio (EROs) desempenham um papel fundamental no enfraquecimento do endosperma em eudicotiledôneas, promovendo a quebra de polissacarídeos na parede celular e facilitando o alongamento da radícula (Li *et al.* 2017). Em espécies como *Solanum lycopersicum* e *Lactuca sativa*, o endosperma micropilar apresenta alta resistência mecânica, o que impede o alongamento da radícula. Chen *et al.* (2016) e Li *et al.* (2023) destacam que o amolecimento do endosperma micropilar é essencial para o crescimento da radícula, permitindo a germinação bem-sucedida.

2.3 Vigor de sementes

O vigor da semente é a soma das propriedades que determinam o desempenho de um lote de sementes e sua capacidade de promover uma emergência rápida e uniforme, resultando no desenvolvimento de plântulas normais em uma ampla variedade de condições de campo (Ista, 2024; Rajjou *et al.*, 2012), e é resultado de uma complexa interação entre fatores genéticos e ambientais (Qun *et al.*, 2007).

Para avaliar o vigor das sementes, os métodos utilizados podem ser divididos em diretos e indiretos (Marcos Filho, 2005). Os métodos diretos são realizados em campo ou em condições laboratoriais que simulam o ambiente natural, enquanto os indiretos se restringem ao laboratório, analisando características físicas, fisiológicas e bioquímicas (Ferreira; Borghetti, 2007).

Dentre os métodos utilizados para determinação do vigor de sementes estão os testes de germinação, condutividade elétrica, coloração com tetrazólio, técnicas de espectroscopia vibracionais, laser biológico *speckle*, espectroscopia de raios X, teste de envelhecimento acelerados, luminescência ultrafraca, tecnologia de imagem hiperespectral (HSI) e espectroscopia de fluorescência (Grasso *et al.*, 2018; Xing *et al.*, 2023; Xiaoyu *et al.*, 2025). Esses métodos são indispensáveis porque, durante o envelhecimento das sementes, ocorrem alterações bioquímicas e fisiológicas, como a redução na produção de etileno (Nascimento, 2000) e mudanças na replicação celular, além de alterações na síntese de DNA e RNA (Cruz-Garcia *et al.*, 1995).

Testar o vigor das sementes por meio de métodos avaliativos é crucial para garantir a alta qualidade das sementes, sendo a taxa de germinação uma característica fenotípica que descreve sua viabilidade (Altizani-Júnior *et al.*, 2024). Por isso, a quantificação do vigor por meio do teste de germinação é essencial, pois simula

diretamente o comportamento germinativo das sementes por meio de avaliações como comprimento, taxa de anormalidades e taxa de germinação (Xing *et al.*, 2023). Segundo Reed *et al.*, (2022), sementes viáveis apresentam altas taxas de germinação, que diminuem à medida que envelhecem. Esse vínculo entre germinação e vigor foi confirmado por estudos genéticos sobre o vigor em culturas como brócolis e arroz (Betthey *et al.*, 2000; Yang *et al.*, 2021).

A condutividade elétrica é um método de análise de vigor realizado por meio da medição de eletrólitos lixiviados da solução em que as sementes estão embebidas, já que o princípio desse método está relacionado aos danos nas membranas celulares, uma vez que sementes com baixo vigor apresentam membranas mais suscetíveis à degradação (Xing *et al.*, 2023). Vários estudos foram realizados para analisar o vigor por meio desse método em sementes de *Pisum sativum* subsp. *arvense* (Machado *et al.*, 2019) e *Glycine max* (Prado *et al.*, 2019).

O teste de tetrazólio é um método de análise de vigor de sementes baseado na redução do composto 2,3,5-trifeniltetrazólio, que forma o produto vermelho 1,3,5-trifenilformazan (TPF) (Xing *et al.*, 2023). Este método é utilizado para verificar o vigor das sementes, baseando-se na coloração dos tecidos embrionários devido à atividade desidrogenase, que gera hidrogênio no estado reduzido durante a respiração (Hernández-Murillo *et al.*, 2023). O hidrogênio reage com o cloreto de 2,3,5-trifeniltetrazólio, formando um composto estável e vermelho, permitindo identificar tecidos ou embriões viáveis (Elnagar *et al.*, 2023; Xu *et al.*, 2024). Esse teste é altamente eficiente na avaliação da qualidade fisiológica, viabilidade e vigor das sementes (Brito *et al.*, 2020) e é reconhecido oficialmente pela International Seed Testing Association (Siyu *et al.*, 2020).

O vigor das sementes pode ser afetado por diversos fatores, como danos mecânicos, ataques de microrganismos e insetos, condições inadequadas de armazenamento, densidade e tamanho das sementes, idade e baixas temperaturas durante a embebição (Carvalho; Nakagawa, 2000). Além disso, estresses hídricos e salinos durante o enchimento das sementes (Wijewardana *et al.*, 2019; Deed *et al.*, 2022) também impactam diretamente o vigor.

Fatores adversos na fase de pré-emergência, como a disponibilidade limitada de água e altas temperaturas durante o desenvolvimento das sementes, têm impacto significativo sobre o vigor das mesmas (Deed *et al.*, 2022). O declínio do vigor está

associado ao envelhecimento acelerado das sementes, o que contribui para sua deterioração (Melo *et al.* 2020). Esse processo pode ser explicado por fenômenos como a morte celular programada (Hu *et al.*, 2012), a redução de espécies reativas de oxigênio (ROS) (Bailly, 2004) e o aumento da peroxidação lipídica (Oenel *et al.*, 2017).

A deterioração controlada, que simula o envelhecimento natural através do aumento da temperatura e do teor de água (Reed *et al.*, 2022), é um método utilizado tanto para avaliar o vigor quanto e a qualidade das sementes (Finch-Savage; Bassel, 2016).

Além disso, a avaliação do desenvolvimento de plântulas é outro indicador frequente de vigor (Marcos Filho, 2005). A taxa de germinação, por exemplo, pode substituir outros ensaios de análise de vigor como teste de tetrazólio, condutividade elétrica e raios X (Reed *et al.*, 2022). Ensaios de imagem automatizados, como a observação da emergência da radícula e a medição da taxa de respiração das sementes, são métodos de fácil replicação (Colmer *et al.*, 2020; Bello; Bradford, 2021).

2.4 Condicionamento fisiológico

O condicionamento fisiológico de sementes é amplamente utilizado para melhorar a germinação e reduzir o tempo necessário para que ela ocorra (Ibrahim, 2016). Essa técnica proporciona maior uniformidade no crescimento das plântulas, permitindo que elas lidem melhor com estresses abióticos e bióticos, além de promover modificações fisiológicas que favorecem o estabelecimento das plântulas (Rehman *et al.* 2018; Khan *et al.*, 2022; Beyaz; Macadam, 2023). Esses efeitos podem ser obtidos por meio de diversos métodos de tratamento de sementes, como o uso de substratos específicos e a aplicação de métodos químicos (Szajnsner *et al.*, 2023).

As técnicas de condicionamento fisiológico podem ser divididas em convencionais e físicas (Thakur *et al.*, 2022). As técnicas convencionais, que são invasivas, envolvem a hidratação controlada das sementes por métodos como condicionamento hídrico, osmótico, químico (incluindo agentes oxidantes), fitormonal, nanopriming, nutripriming, halopriming e matricionamento em substratos sólidos. Segundo Khan (2022), o objetivo dessas técnicas é aumentar a taxa de germinação e melhorar a uniformidade na emergência das plântulas.

Por outro lado, as técnicas físicas, que são não invasivas, não requerem hidratação das sementes (Khan *et al.*, 2022). Elas incluem métodos como irradiação com micro-

ondas, aplicação de campos elétricos (Szajsner *et al.*, 2023), luz visível (Rybinski; Garzynski, 2004), atmosfera fria, irradiação UV, radiação gama e irradiação ionizante (Bliznyuk *et al.*, 2023).

Dentre as técnicas convencionais, o condicionamento osmótico é bastante utilizado e envolve a embebição das sementes em soluções de polietilenoglicol (PEG), o que permite a hidratação controlada até potenciais hídricos específicos, ativando processos bioquímicos, como a respiração (Marcos Filho, 2005). Além do PEG, outras soluções, como sais minerais inorgânicos (NaCl, KNO₃, MgSO₄, MgCl₂, KH₂PO₄), manitol e glicerol, também podem ser usadas para ajustar o potencial osmótico das sementes (Marcos Filho, 2005). O condicionamento osmótico promove benefícios como aumento na taxa de germinação, redução do tempo médio de germinação, uniformidade das plântulas, maior comprimento de raízes, e incremento no vigor e qualidade das sementes, comprovados em espécies como *Tabebuia roseoalba* (SILVA *et al.* 2020) e *Allium ascalonicum L.* (Kamanga *et al.*, 2024).

Ainda no âmbito dos tratamentos químicos, o condicionamento com peróxido de hidrogênio (H₂O₂) tem ganhado destaque como uma estratégia eficiente. O (H₂O₂) atua como uma molécula sinalizadora que, em baixas concentrações, interfere na dormência das sementes e estimula a expressão de proteínas relacionadas à defesa e ao crescimento (Tania *et al.*, 2022). Esse pré-tratamento oxidativo pode aumentar a atividade de enzimas antioxidantes, protegendo a semente contra danos oxidativos futuros e melhorando o desempenho germinativo sob condições de estresse. (Nasirzadeh *et al.* 2021)

O matricionamento, outra técnica convencional, consiste em embebição controlada das sementes em substratos sólidos úmidos, limitando a absorção de água até atingir o potencial mátrico desejado (Marcos Filho, 2005). Essa técnica utiliza materiais como vermiculita, carvão, turfa, argila e areia (Barupal *et al.* 2022) e favorece a reorganização de componentes celulares e a redução de injúrias durante a embebição, promovendo maior eficiência germinativa e emergência de plântulas em culturas como *Abelmoschus esculentus* (Meredy, 2015), *Brassica oleracea* e *Brassica rapa* (Wu *et al.* 2019) e *Vigna radiata* (Sen *et al.*, 2020).

2.5 Efeito da salinidade nas plantas

O estresse salino representa uma das maiores ameaças à agricultura sustentável, impondo uma severa restrição ao crescimento e à produtividade das plantas (Ghosh *et al.*, 2025), através de uma combinação de efeitos fisiológicos como estresses osmóticos, iônicos e oxidativos (Nikolic *et al.*, 2023).

A alta concentração de sais no solo reduz o potencial hídrico externo, desencadeando um rápido estresse osmótico que limita a capacidade das raízes de absorver água, gerando uma seca fisiológica (Bu *et al.*, 2024). provocando o fechamento estomático como mecanismo de defesa, o que, por sua vez, restringe a pressão osmótica nas células-guarda, limitando a difusão do CO₂ o que reduz a eficiência fotossintética (Zahra *et al.*, 2022).

O estresse iônico é caracterizado pelo acúmulo de íons tóxicos, principalmente Na⁺ e Cl⁻, nos tecidos vegetais (Zhou *et al.*, 2018). A toxicidade do Na⁺ é particularmente danosa, pois ele compete com o K⁺ por sítios de ligação em proteínas transportadoras e enzimas, perturbando a homeostase iônica e resultando em um desequilíbrio nutricional crítico que afeta processos metabólicos das plantas (Jia *et al.*, 2017).

Inevitavelmente, a perturbação no metabolismo celular, provoca desequilíbrio energético especialmente nos fotossistemas I e II, nos cloroplastos, nas cadeia de transporte de elétrons nas mitocôndrias (Ghosh *et al.*, 2025), leva a um desequilíbrio redox e à produção excessiva de espécies reativas de oxigênio (EROs), deflagrando um estresse oxidativo secundário (Sachdev *et al.*, 2021). Esse surto de EROs sobrecarrega o sistema de defesa antioxidante que causa danos na integridade estrutural e funcional das células (Pooja *et al.*, 2025), como a peroxidação de lipídios nas membranas, afetando a permeabilidade e fluidez (Bejaoui *et al.*, 2016) a desnaturação de proteínas e danos ao DNA, exacerbando os efeitos iniciais e podendo culminar na senescência e morte da planta (Du *et al.*, 2018).

2.5 Mecanismos do Condicionamento com Peróxido de Hidrogênio (H₂O₂) em Plantas

O condicionamento com peróxido de hidrogênio (H₂O₂) fundamenta-se na premissa de que a exposição prévia a concentrações controladas deste oxidante induz um estado fisiológico de "alerta". Este processo eleva transitoriamente os níveis endógenos de H₂O₂, ativando mecanismos de defesa latentes sem, contudo, atingir o limiar de toxicidade associado ao estresse oxidativo severo (Habib *et al.*, 2020). A eficácia dessa

estratégia reside na dualidade funcional do H_2O_2 , cuja atuação oscila entre agente danoso e molécula sinalizadora, dependendo estritamente de sua concentração e da compartimentalização celular (Qureshi *et al.*, 2022).

Como resposta imediata a esse estado de alerta, ocorre uma reconfiguração metabólica caracterizada pela regulação positiva do sistema antioxidante (Goharrizi; Karami; Ghanaei, 2024). Embora estresses abióticos, como a salinidade, induzam tipicamente a produção descontrolada de Espécies Reativas de Oxigênio (EROs) e consequentes danos a proteínas, lipídios e DNA (Hasanuzzaman *et al.*, 2021), o pré-tratamento com H_2O_2 capacita a planta para uma eliminação mais eficiente desses radicais. Tal competência é adquirida via ativação de enzimas chave, como superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT) e componentes do ciclo ascorbato-glutationa (APX, GPX, GST), associada ao incremento de antioxidantes não enzimáticos e ao fortalecimento da regulação osmótica (Hasanuzzaman *et al.*, 2020).

Paralelamente à defesa antioxidante, o H_2O_2 desempenha um papel determinante na manutenção da homeostase iônica e da eficiência fotossintética, fatores críticos para a sobrevivência vegetal sob condições adversas (Goharrizi; Karami; Ghanaei, 2024). Em cenários de salinidade, que favorecem o acúmulo tóxico de sódio (Na^+) e a degradação tecidual, o peróxido atua na regulação de transportadores de membrana (SILVA *et al.*, 2020). Esse mecanismo otimiza o equilíbrio eletrolítico ao ativar canais específicos, como a bomba H^+ -ATPase e o antiportador SOS1, facilitando a exclusão do Na^+ citosólico e a retenção de potássio (K^+), mitigando assim a toxicidade iônica celular (Pandey *et al.*, 2021; Goharrizi; Karami; Ghanaei, 2024).

A orquestração dessa resposta adaptativa complexa é governada, em última análise, por intrincadas vias de sinalização molecular (Goharrizi; Karami; Ghanaei, 2024). O H_2O_2 atua como um mensageiro secundário que modula a expressão gênica (Mittler, 2002), induzindo a codificação de chaperonas, enzimas de desintoxicação e fatores de transcrição (González *et al.*, 2012). Conforme elucidado por (Xing; Jia; Zhang, 2008), esse sinal oxidativo é transduzido por cascatas de proteínas quinases ativadas por mitógenos (MAPKs) e flutuações de cálcio citosólico, ativando reguladores transcricionais como ZAT e WRKY. Adicionalmente, estabelece-se um *crosstalk* hormonal onde o H_2O_2 interage com vias do ácido abscísico (ABA), etileno e óxido nítrico, coordenando desde o fechamento estomático até a expressão de proteínas de choque térmico (Saxena; Srikanth; Chen, 2016; Araújo *et al.*, 2021). Essa reprogramação

transcriptômica e proteômica consolida uma "memória de estresse", permitindo respostas mais robustas a desafios ambientais subsequentes (Goharrizi; Karami; Ghanaei, 2024).

2.6 Enzimas do sistema antioxidante

As enzimas do sistema antioxidante são biomoléculas essenciais que previnem danos oxidativos em organismos vivos submetidos a estresses, convertendo substâncias prejudiciais em compostos inofensivos (Scandalios, 1993). Diversas enzimas atuam nesse sistema de defesa celular, sendo capazes de neutralizar ou eliminar as espécies reativas de oxigênio (EROs) (Hatami; Ghorbanpour, 2024).

Esses antioxidantes desempenham um papel crucial na neutralização de radicais livres produzidos quando as plantas são submetidas a condições adversas (Longo *et al.*, 2017). Segundo Wang *et al.* (2023), as principais enzimas antioxidantes incluem a superóxido dismutase (SOD), a catalase (CAT), a ascorbato peroxidase (APX) e a monodeidroascorbato redutase (MDAR).

Essas enzimas são fundamentais para o equilíbrio redox, protegendo as células contra danos oxidativos sob estresse abiótico (Wang *et al.*, 2023). A superóxido dismutase (SOD) atua como a primeira linha de defesa, catalisando a conversão do radical superóxido (O_2^-) em peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e oxigênio molecular (O_2) (He *et al.*, 2016).

A catalase (CAT), por sua vez, reduz a toxicidade do peróxido de hidrogênio, convertendo-o em água (H_2O) e oxigênio molecular (O_2). Essa ação previne danos teciduais, especialmente nos peroxissomos, e evita a inibição do ciclo de Calvin nos cloroplastos (He *et al.*, 2016; Hatami; Ghorbanpour, 2024).

Paralelamente, a peroxidase (POD) auxilia na decomposição do H_2O_2 , oxidando compostos fenólicos como o guaiacol (Hatami; Ghorbanpour, 2024), enquanto a ascorbato peroxidase (APX) utiliza o ascorbato como doador de elétrons para transformar o H_2O_2 em água (Ma *et al.*, 2016). A regeneração do ascorbato é garantida pela monodeidroascorbato redutase (MDAR), assegurando a continuidade do ciclo antioxidante (Wang *et al.*, 2023).

Em sementes, especialmente aquelas com altos teores de água, o aumento de radicais livres pode elevar os níveis de EROs, causando danos oxidativos a lipídios,

proteínas e ácidos nucleicos, o que compromete macromoléculas essenciais (Andrés Juan *et al.*, 2021).

Nesse contexto, o condicionamento de sementes com H₂O₂ atua como um potente sinalizador, ativando as defesas antioxidantes e estabilizando o equilíbrio redox através da regulação positiva de diversos genes (Iqbal *et al.*, 2025). No entanto, esse tratamento apresenta um comportamento dose-dependente: doses baixas induzem a atividade enzimática benéfica, enquanto doses elevadas tendem a causar toxicidade celular e reduzir significativamente a atividade dessas enzimas em comparação ao material não tratado (Iqbal *et al.*, 2025). Essa indução enzimática, seja pela expressão gênica ou modulação estrutural, é essencial para uma resposta rápida a mudanças ambientais (Foyer *et al.*, 1997).

Estudos indicam que a aplicação exógena de H₂O₂ aumentou significativamente a atividade de enzimas como SOD, CAT e APX, promovendo resiliência a vários estresses (Iqbal *et al.*, 2025). Esses efeitos foram documentados em espécies como *Brassica oleracea*, *Zea mays* e *Solanum lycopersicum* (Ellouzi *et al.*, 2021; Gelaw; Sanan-Mishra, 2024; Ahammed *et al.*, 2025). Além disso, observa-se a regulação positiva do sistema de defesa não enzimático, como o aumento de ascorbato e glutatona (IQBAL *et al.*, 2025), fato corroborado em estudos com *Triticum aestivum*, *Fagopyrum esculentum* e *Chenopodium quinoa* (Arıcan; Demirbaş, 2022; Yao *et al.*, 2022; Iqbal *et al.*, 2023).

REFERÊNCIAS

ABD ELHADY, S. A. *et al.* Hydrogen peroxide supplementation in irrigation water alleviates drought stress and boosts growth and productivity of potato plants. **Sustainability**, v. 13, n. 2, p. 899, 2021.

AFZAL, M. K. *et al.* Nitric Oxide and Hydrogen Peroxide Coordinate to Improve Photosynthesis, Oxidative Defense, Osmoregulation, and Ions Homeostasis in Pea (*Pisum sativum* L.) Under Drought. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 25, n. 2, p. 2534-2558, 2025.

AHAMMED, G. J. *et al.* Hydrogen peroxide signaling mediates dopamine-induced chromium stress tolerance in tomato. **Environmental Pollution**, v. 371, p. 125949, 2025.

ALTIZANI-JÚNIOR, J. C. *et al.* Optimizing Basil Seed Vigor Evaluations: An Automatic Approach Using Computer Vision-Based Technique. **Horticulturae**, v. 10, n. 11, p. 1220, 2024.

ALVAREZ, J. *et al.* Germination performance and hydro-time model for magneto-primed and osmotic-stressed triticale seeds. **Rom. J. Phys.**, v. 66, p. 801, 2021.

ANDRÉS JUAN, C. *et al.* The chemistry of Reactive oxygen Species (ROS) revisited: Outlining their role in biological macromolecules (DNA, lipids and proteins) and induced pathologies. 2021.

ARAUJO, G. S *et al.* H₂O₂ priming induces proteomic responses to defense against salt stress in maize. **Plant Molecular Biology**, v. 106, n. 1, p. 33-48, 2021.

ARAUJO, M. J. *et al.* Initial productivity and genetic parameters of three *Corymbia* species in Brazil: designing a breeding strategy. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 51, n. 1, p. 25-30, 2021.

BAILLY, C. Active oxygen species and antioxidants in seed biology. **Seed science research**, v. 14, n. 2, p. 93-107, 2004.

BARRS, H. D.; WEATHERLEY, P. E. A re-examination of the relative turgidity technique for estimating water deficits in leaves. **Australian journal of biological sciences**, v. 15, n. 3, p. 413-428, 1962.

BARUPAL, S. *et al.* Seed priming: A effective method for enhancing seed quality and plant stand establishment in okra (*Abelmoschus esculentus* L.). **The Pharma Innovation Journal**, v. 11, p. 1359-1364, 2022.

BEJAOUI, F *et al.* Changes in chloroplast lipid contents and chloroplast ultrastructure in *Sulla carnosa* and *Sulla coronaria* leaves under salt stress. **Journal of Plant Physiology**, v. 198, p. 32-38, 2016.

BELLO, P.; BRADFORD, K. J. Relationships of Brassica seed physical characteristics with germination performance and plant blindness. **Agriculture**, v. 11, n. 3, p. 220, 2021.

BETTEY, M. *et al.* Quantitative genetic analysis of seed vigor and pre-emergence seedling growth traits in Brassica oleracea. **The New Phytologist**, v. 148, n. 2, p. 277-286, 2000.

- BEWLEY, J. D. Seed germination and dormancy. **The plant cell**, v. 9, n. 7, p. 1055, 1997.
- BEWLEY, J. D.; BLACK, M. Seeds: physiology of development and germination. **Springer Science & Business Media**, 2013.
- BEYAZ, R.; MACADAM, J. W. X-radiation of *Lotus corniculatus* L. seeds improve germination and initial seedling growth. **International Journal of Radiation Biology**, v. 99, n. 11, p. 1794-1799, 2023.
- BLIZNYUK, U. *et al.* Effects of X-Ray irradiation on germination and phytosanitary condition of cereal and oilseed crops. In: **E3S Web of Conferences**. EDP Sciences, 2023.
- BOLAND, D.J.; BROOKER, M.H.; CHIPPENDALE, G.M. *et al.* Forest trees of Australia. 4.ed. Melbourne: CSIRO, 1994. 687p.
- BRAWNER, J. T. *et al.* Selection of *Corymbia citriodora* for pulp productivity. **Southern Forests: a Journal of Forest Science**, v. 74, n. 2, p. 121-131, 2012.
- BRITO, W. A. L. *et al.* Evaluation of viability of *Tabebuia aurea* seeds through tetrazolium test. **Revista Caatinga**, v. 33, p. 993-999, 2020.
- BU, Y *et al.* Unraveling the role of urea hydrolysis in salt stress response during seed germination and seedling growth in *Arabidopsis thaliana*. **Elife**, v. 13, p. e96797, 2024.
- CARVALHO, N. M.; NAKAGAWA, J. Sementes: ciência, tecnologia e produção. 1983.
- CHEN, B.; MA, J.; XU, Z.; WANG, X. Regulação do ácido abscísico e do etefon da celulase na capa do endosperma e na radícula durante a germinação da semente de alface. *J. Integr. Plant Biol.* **2016.1**, 58, 859–869.
- COLMER, J. *et al.* Seed Germ: uma plataforma de fenotipagem econômica para geração automatizada de imagens de sementes e análise fenotípica baseada em aprendizado de máquina da germinação de sementes de culturas. **New Phytologist**, v. 228, n. 2, p. 778-793, 2020.
- CRUZ-GARCIA, F. *et al.* Seed deterioration and respiration as related to DNA metabolism in germinating maize. 1995.
- DU, Y-T *et al.* Identification and characterization of GmMYB118 responses to drought and salt stress. **BMC Plant Biology**, v. 18, n. 1, p. 320, 2018.

ELLOUZI, H.; SGHAYAR, S.; ABDELLY, C. H₂O₂ seed priming improves tolerance to salinity; drought and their combined effect more than mannitol in *Cakile maritima* when compared to *Eutrema salsugineum*. **Journal of Plant Physiology**, v. 210, p. 38-50, 2017.

ELNAGAR, A. A. A *et al.* Influence of seed treatments on seed quality, seed viability, and seedling vigor of some peanut cultivars under sandy soil conditions. **Zagazig Journal of Agricultural Research**, v. 50, n. 1, p. 29-42, 2023.

FERREIRA, A. G.; BORGHETTI, F. Germinação: do básico ao aplicado. Porto Alegre: Artmed, 2007. 323 p.

FINCH-SAVAGE, W. E.; BASSEL, G. W. Seed vigour and crop establishment: extending performance beyond adaptation. **Journal of experimental botany**, v. 67, n. 3, p. 567-591, 2016.

FOYER, C. H. *et al.* Hydrogen peroxide-and glutathione-associated mechanisms of acclimatory stress tolerance and signalling. **Physiologia plantarum**, v. 100, n. 2, p. 241-254, 1997.

GELAW, T. A.; SANAN-MISHRA, N. Molecular priming with H₂O₂ and proline triggers antioxidant enzyme signals in maize seedlings during drought stress. **Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-General Subjects**, v. 1868, n. 7, p. 130633, 2024.

GHOSH, T *et al.* Hormonal signaling at seed germination and seedling stage of plants under salinity stress. **Plant Growth Regulation**, p. 1-18, 2025.

GOLFARI, L.; CASER, R. L.; MOURA, V. P. G. Zoneamento ecológico esquemático para reflorestamento no Brasil (2. a aproximação). 1978.

GONZÁLEZ, A *et al.* Cross talk among calcium, hydrogen peroxide, and nitric oxide and activation of gene expression involving calmodulins and calcium-dependent protein kinases in *Ulva compressa* exposed to copper excess. **Plant Physiology**, v. 158, n. 3, p. 1451-1462, 2012.

HABIB, N *et al.* Use of nitric oxide and hydrogen peroxide for better yield of wheat (*Triticum aestivum* L.) under water deficit conditions: growth, osmoregulation, and antioxidative defense mechanism. **Plants**, v. 9, n. 2, p. 285, 2020.

HASANUZZAMAN, M *et al.* Reactive oxygen species and antioxidant defense in plants under abiotic stress: Revisiting the crucial role of a universal defense regulator. **Antioxidants**, v. 9, n. 8, p. 681, 2020.

HASANUZZAMAN, M *et al.* Regulation of reactive oxygen species and antioxidant defense in plants under salinity. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 22, n. 17, p. 9326, 2021.

HATAMI, M.; GHORBANPOUR, M. Metal and metal oxide nanoparticles-induced reactive oxygen species: Phytotoxicity and detoxification mechanisms in plant cell. **Plant Physiology and Biochemistry**, p. 108847, 2024.

HE, L. *et al.* Autophagy and the nutritional signaling pathway. **Front Agr Sci Eng**, v. 3, n. 03, p. 222-230, 2016.

HERNÁNDEZ-MURILLO, J. R. *et al.* Tetrazolium test to estimate the physiological quality of tamarind (*Tamarindus indica* L.) seeds. **Revista de Ciencias Agrícolas**, v. 40, n. 2, 2023.

HU, D. I. E. *et al.* Spatial and temporal nature of reactive oxygen species production and programmed cell death in elm (*Ulmus pumila* L.) seeds during controlled deterioration. **Plant, Cell & Environment**, v. 35, n. 11, p. 2045-2059, 2012.

IBRAHIM, E. A. Seed priming to alleviate salinity stress in germinating seeds. **Journal of plant physiology**, v. 192, p. 38-46, 2016.

INSUAN, W.; CHAHOMCHUEN, T. Chemical composition and antimicrobial activity of essential oil extracted from *Eucalyptus citriodora* leaf. 2020.

INTERNATIONAL RULES FOR SEED TESTING. ISTA. Zürich, 2004. 180 p.

IQBAL, H. *et al.* From Lab to Field: Harnessing H₂O₂-Mediated Upregulation of Plant Capacities Under Abiotic Stresses. **Physiologia Plantarum**, v. 177, n. 5, p. e70488, 2025.

JAMSHIDI GOHARRIZI, K.; KARAMI, S.; GHANAELI, S. Hydrogen peroxide priming promotes salinity tolerance in plants—A comprehensive review. **Agronomy Journal**, v. 116, n. 2, p. 612-629, 2024.

KAMANGA, B. M. *et al.* Effect of seed invigoration by osmo-conditioning on radicle emergence and physiological parameters of the true seed of shallot (*Allium ascalonicum* L.). **Horticultural Science**, v. 51, n. 1, p. 39-50, 2024.

KAUR, R.; PRASAD, K. Elucidation of temperature dependent hydration behaviour of chickpea seeds: Prerequisite for germination. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 50, p. 102669, 2023.

KHAN, M. O. *et al.* A practical and economical strategy to mitigate salinity stress through seed priming. **Frontiers in Environmental Science**, v. 10, p. 991977, 2022.

LONGO, V. *et al.* Proteomic and physiological response of spring barley leaves to cold stress. **cell**, v. 6, n. 7, p. 1-10, 2017.

LORENZI, H. **Árvores exóticas no Brasil: madeireiras, ornamentais e aromáticas**. Instituto Plantarum de Estudos da Flora, 2003.

MACHADO, C. G. *et al.* Discrimination of forage pea seed lots by means of multivariate techniques. **Científica**, v. 47, n. 3, p. 321-326, 2019.

MARCOS FILHO, J. *Fisiologia de sementes de plantas cultivadas*. Piracicaba: FEALQ, 2005. 495 p.

MELO, S. M. B. *et al.* Oxidative status of *Moringa oleifera* Lam. seeds during storage. **South African journal of botany**, v. 129, p. 429-434, 2020.

MEREDDY, R. Solid matrix priming improves seedling vigor of okra seeds. In: **Proceedings of the Oklahoma Academy of Science**. 2015. p. 33-37.

MIRANSARI, M.; SMITH, D. L. Plant hormones and seed germination. **Environmental and experimental botany**, v. 99, p. 110-121, 2014.

MITTLER, R. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. **Trends in plant science**, v. 7, n. 9, p. 405-410, 2002.

NASCIMENTO, W. M. Envolvimento do etileno na germinação de sementes. *Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal*, v.12, p.163-174, 2000.

NIKOLIĆ, N *et al.* Effects of the salinity-temperature interaction on seed germination and early seedling development: a comparative study of crop and weed species. **BMC Plant Biology**, v. 23, n. 1, p. 446, 2023.

NOGUEIRA, A. *et al.* Seed germination and seedling development assisted by ultrasound: gaps and future research directions. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 104, n. 2, p. 583-597, 2024.

NONOGAKI, H.; BASSEL, G. W.; BEWLEY, J. D. Germination—still a mystery. **Plant science**, v. 179, n. 6, p. 574-581, 2010.

NONOGAKI, H.; GEE, O. H.; BRADFORD, K. J. A germination-specific endo- β -mannanase gene is expressed in the micropylar endosperm cap of tomato seeds. **Plant physiology**, v. 123, n. 4, p. 1235-1246, 2000.

O'BRIEN, A. M. *et al.* Microbial effects on plant phenology and fitness. **American journal of botany**, v. 108, n. 10, p. 1824-1837, 2021.

OENEL, A. *et al.* Enzymatic and non-enzymatic mechanisms contribute to lipid oxidation during seed aging. **Plant and Cell Physiology**, v. 58, n. 5, p. 925-933, 2017.

PANDEY, M *et al.* Thiourea and hydrogen peroxide priming improved K⁺ retention and source-sink relationship for mitigating salt stress in rice. **Scientific reports**, v. 11, n. 1, p. 3000, 2021.

PANIKAR, S. *et al.* Morphological, chemoprofile and soil analysis comparison of *Corymbia citriodora* (Hook.) KD Hill and LAS Johnson along with the green synthesis of iron oxide nanoparticles. **Journal of King Saud University-Science**, v. 34, n. 5, p. 102081, 2022.

POOJA, P *et al.* Role played by arbuscular mycorrhizal fungi in amelioration of salinity stress: a review. **Plant and Soil**, v. 511, n. 1, p. 27-42, 2025.

PRADO, J. P. *et al.* Physiological potential of soybean seeds and its relationship to electrical conductivity. **Journal of Seed Science**, v. 41, p. 407-415, 2019.

QUN, S.; WANG, J.; SUN, B. Advances on seed vigor physiological and genetic mechanisms. **Agricultural Sciences in China**, v. 6, n. 9, p. 1060-1066, 2007.

QURESHI, M. K *et al.* Hydrogen peroxide-induced stress acclimation in plants. **Cellular and Molecular Life Sciences**, v. 79, n. 2, p. 129, 2022.

RAJJOU, L. *et al.* Seed germination and vigor. **Annual review of plant biology**, v. 63, n. 1, p. 507-533, 2012.

REED, R. C.; BRADFORD, K. J.; KHANDAY, I. Seed germination and vigor: ensuring crop sustainability in a changing climate. **Heredity**, v. 128, n. 6, p. 450-459, 2022.

REHMAN, A. *et al.* Seed priming of Zn with endophytic bacteria improves the productivity and grain biofortification of bread wheat. **European Journal of Agronomy**, v. 94, p. 98-107, 2018.

ROCHA, J. *et al.* Ecological adaptation of Australian Myrtaceae through the leaf waxes analysis: *Corymbia citriodora*, *Eucalyptus gunnii*, and *Eucalyptus globulus*. **Flora**, v. 310, p. 152435, 2024.

RYBINSKI, W.; GARCZYNSKI, S. Influence of laser light on leaf area and parameters of photosynthetic activity in DH lines of spring barley *Hordeum vulgare* L. **International Agrophysics**, v. 18, n. 3, 2004.

SACHDEV, S *et al.* Abiotic stress and reactive oxygen species: Generation, signaling, and defense mechanisms. **Antioxidants**, v. 10, n. 2, p. 277, 2021.

SAHAB, S. *et al.* Potential risk assessment of soil salinity to agroecosystem sustainability: Current status and management strategies. **Science of the Total Environment**, v. 764, p. 144164, 2021.

SANCHEZ, J.; MANGAT, P. K.; ANGELES-SHIM, R. B. Weathering the cold: Modifying membrane and storage fatty acid composition of seeds to improve cold germination ability in upland cotton (*Gossypium hirsutum* L.). **Agronomy**, v. 9, n. 11, p. 684, 2019.

SAXENA, I.; SRIKANTH, S.; CHEN, Z. Cross talk between H₂O₂ and interacting signal molecules under plant stress response. **Frontiers in plant science**, v. 7, p. 570, 2016.

SCANDALIOS, J.G. Oxygen stress and superoxide dismutases. *Plant Physiology*, v.101, n.1, p.7-12, 1993

SCHILTZ, S. *et al.* A review: what is the spermosphere and how can it be studied? **Journal of Applied Microbiology**, v. 119, n. 6, p. 1467-1481, 2015.

SEN, S. K. *et al.* Improvisation of salinity stress response in mung bean through solid matrix priming with normal and nano-sized chitosan. **International journal of biological macromolecules**, v. 145, p. 108-123, 2020.

SILVA, A. C. *et al.* Osmotic treatment, growth regulator and rooter in *Tabebuia roseoalba* (RIDL.) Sandwith seeds for direct sowing. **Journal of Seed Science**, v. 42, p. e202042022, 2020.

SILVA, P. C. C *et al.* Salt-tolerance induced by leaf spraying with H₂O₂ in sunflower is related to the ion homeostasis balance and reduction of oxidative damage. **Heliyon**, v. 6, n. 9, 2020.

SIRAMON, P.; OHTANI, Y.; ICHIURA, H. Chemical composition and antifungal property of *Eucalyptus camaldulensis* leaf oils from Thailand. **Rec. Nat. Prod.**, v. 7, n. 1, p. 49-53, 2013.

SIYU, Z *et al.* Study on rapid determination of seed viability of *Tilia miqueliana* based on TTC method. *Seed*, 39, 154-156. 2020.

SZAJSNER, H. *et al.* Conditioning of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) sowing material. **Scandinavian Journal of Forest Research**, v. 38, n. 1-2, p. 1-8, 2023.

TAIZ, L. *et al.* **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. Artmed Editora, 2017.

THAKUR, A. *et al.* Cold priming the chickpea seeds imparts reproductive cold tolerance by reprogramming the turnover of carbohydrates, osmo-protectants and redox components in leaves. **Scientia Horticulturae**, v. 261, p. 108929, 2020.

THAKUR, M. *et al.* Recent advances in seed priming strategies for enhancing planting value of vegetable seeds. **Scientia Horticulturae**, v. 305, p. 111355, 2022.

TOLBA, H. *et al.* Essential oil of Algerian *Eucalyptus citriodora*: Chemical composition, antifungal activity. **Journal de mycologie medicale**, v. 25, n. 4, p. e128-e133, 2015.

VITTI, A. M. S.; BRITO, J. O. Óleo essencial de eucalipto. **Documentos florestais**, v. 17, n. 3, p. 1-26, 2003.

WANG, J. *et al.* Ionizing radiation: Effective physical agents for economic crop seed priming and the underlying physiological mechanisms. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 23, n. 23, p. 15212, 2022.

WANG, X. *et al.* Effect of heat stress on root architecture, photosynthesis, and antioxidant profile of water spinach (*Ipomoea aquatica* Forsk) seedlings. **Horticulturae**, v. 9, n. 8, p. 923, 2023.

WEITBRECHT, K.; MÜLLER, K.; LEUBNER-METZGER, G. First off the mark: early seed germination. **Journal of experimental botany**, v. 62, n. 10, p. 3289-3309, 2011.

WIJewardana, C. *et al.* Drought stress has transgenerational effects on soybean seed germination and seedling vigor. **PLoS one**, v. 14, n. 9, p. e0214977, 2019.

WIN, T. T.; MYINT, Z. Z. W.; MON, T. T. A Study on Extraction of Essential Oil from the Leaves of *Eucalyptus citriodora* Hook. (*Eucalyptus*) and Its Antimicrobial Activity. 2024.

WU, L. *et al.* Effects of solid matrix priming (SMP) and salt stress on broccoli and cauliflower seed germination and early seedling growth. **Scientia Horticulturae**, v. 255, p. 161-168, 2019.

XING, M. *et al.* Physiological alterations and nondestructive test methods of crop seed vigor: A comprehensive review. **Agriculture**, v. 13, n. 3, p. 527, 2023.

XING, Y.; JIA, W.; ZHANG, J. ATMKK1 mediates ABA-induced CAT1 expression and H₂O₂ production via AtMPK6-coupled signaling in Arabidopsis. **The Plant Journal**, v. 54, n. 3, p. 440-451, 2008.

XU, F. *et al.* Genome-wide association, RNA-seq and iTRAQ analyses identify candidate genes controlling radicle length of wheat. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 939544, 2022.

XU, J. *et al.* Tetrazolium viability test method for micro-seeds of the endangered plant *Deinantho caerulea*. **Seed Science and Technology**, v. 52, n. 1, p. 57-66, 2024.

YANG, J. *et al.* Identification of QTL and candidate genes involved in early seedling growth in rice via high-density genetic mapping and RNA-seq. **The Crop Journal**, v. 9, n. 2, p. 360-371, 2021.

ZAHRA, N. *et al.* Regulation of photosynthesis under salt stress and associated tolerance mechanisms. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 178, p. 55-69, 2022.

ZHANG, Y. *et al.* Phospholipase D α 1 and phosphatidic acid regulate NADPH oxidase activity and production of reactive oxygen species in ABA-mediated stomatal closure in Arabidopsis. **The Plant Cell**, v. 21, n. 8, p. 2357-2377, 2009.

ZHOU, Y. *et al.* Changes of ion absorption, distribution and essential oil components of flowering *Schizonepeta tenuifolia* under salt stress. **Zhongguo Zhong Yao za Zhi Zhongguo Zhongyao Zazhi China Journal of Chinese Materia Medica**, v. 43, n. 22, p. 4410-4418, 2018.

ELLOUZI, H. *et al.* Seed-priming with H₂O₂ alleviates subsequent salt stress by preventing ROS production and amplifying antioxidant defense in cauliflower seeds and seedlings. **Scientia Horticulturae**, v. 288, p. 110360, 2021.

ARICAN, E. S.; DEMIRBAŞ, S. Effects of sequential hydrogen peroxide applications on salt stress tolerance in bread wheat varieties. **Journal of Agricultural Sciences**, v. 28, n. 4, p. 592-602, 2022.

YAO, X. *et al.* Physiological and biochemical regulation mechanism of exogenous hydrogen peroxide in alleviating NaCl stress toxicity in tartary buckwheat (*Fagopyrum tataricum* (L.) Gaertn.). **International Journal of Molecular Sciences**, v. 23, n. 18, p. 10698, 2022.

IQBAL, H. *et al.* Salinity and exogenous H₂O₂ improve gas exchange, osmoregulation, and antioxidant metabolism in quinoa under drought stress. **Physiologia Plantarum**, v. 175, n. 6, p. e14057, 2023.

COSTELLA, C. *et al.* Mini-tunnel and season influence in clonal garden on the production of clonal seedlings for two subtropical clones: *Eucalyptus saligna* and *Corymbia torelliana* × *Corymbia citriodora*. **iForest-Biogeosciences and Forestry**, v. 18, n. 3, p. 154, 2025.

LIMA, M. S. *et al.* Mini-cutting technique application in *Corymbia* and *Eucalyptus*: effects of mini-tunnel use across seasons of the year. **New Forests**, v. 53, n. 1, p. 161-179, 2022.

XIAOYU, W. *et al.* Evaluation and development trends of optical detection technology for seed vigor. **Spectroscopy**, 2025.

GRASSO, R. *et al.* Non-destructive evaluation of watermelon seeds germination by using Delayed Luminescence. **Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology**, v. 187, p. 126-130, 2018.

TANIA, S. S. *et al.* Alleviation of salt-inhibited germination and seedling growth of kidney bean by seed priming and exogenous application of salicylic acid (SA) and hydrogen peroxide (H₂O₂). **Seeds**, v. 1, n. 2, p. 87-98, 2022.

NASIRZADEH, L. *et al.* Changes in antioxidant enzyme activities and gene expression profiles under drought stress in tolerant, intermediate, and susceptible wheat genotypes. **Cereal Research Communications**, v. 49, n. 1, p. 83-89, 2021.

ARTIGO 1

ARTIGO 1 – CONDICIONAMENTO DAS SEMENTES COM PERÓXIDO DE HIDROGÊNIO MITIGA OS EFEITOS DO ESTRESSE SALINO DURANTE A GERMINAÇÃO E CRESCIMENTO INICIAL DE PLÂNTULAS DE *Corymbia citriodora*.

RESUMO

O *Corymbia citriodora*, é uma espécie de grande importância para o setor florestal brasileiro, comumente cultivada em diferentes solos e regiões, com baixo nutriente e recursos hídrico, no entanto. Estresses abióticos como a salinidade representa uma ameaça crescente à sua germinação, estabelecimento e produtividade. Portanto, o presente estudo investigou o potencial do peróxido de hidrogênio (H_2O_2) como agente de condicionamento osmótico, para melhorar os índices de germinação, as características das plântulas e a tolerância à salinidade no *C. citriodora*. O experimento foi conduzido em condições controladas, utilizando delineamento experimental inteiramente casualizado, em esquema fatorial, com cinco repetições de vinte sementes. Sementes foram pré-tratadas em H_2O_2 (0, 100, 200 e 400 mM). As plântulas foram cultivadas por 14 em condições controle (0) e germinadas sob estresse induzido por cloreto de sódio (NaCl) (0, 75 e 150 mM). O estresse salino inibiu significativamente ($P < 0,05$), o percentual de germinação, o índice de vigor das sementes, comprimento radicular e teor de clorofila. Por outro lado, sementes pré-tratadas melhoraram significativamente ($P < 0,05$) com aceleração da germinação, os índices de vigor das sementes e comprimento da raiz e conteúdo de antocianinas. Dada a resposta germinativa uniforme entre as doses de H_2O_2 a dose de 100 mM e hidrocondicionamento para isolar o efeito do H_2O_2 , foi selecionada para o estudo bioquímico sob esquema fatorial (2 agentes condicionantes \times 4 tempos de embebição + controle). Ambos os condicionamentos não foram capazes de induzir de forma superexpressão de enzimas antioxidantes (SOD, CAT, APX) e diminuir a peroxidação lipídica (MDA). Por outro lado, os agentes condicionantes foram eficientes em reduzir os níveis endógenos de H_2O_2 , indicando que o efeito protetor advém de um ajuste fino do estado redox.

INTRODUÇÃO

Corymbia citriodora (Hook) K.D. Hill, uma Myrtaceae de expressiva importância econômica para o setor florestal devido à sua madeira, óleos essenciais e resiliência a pragas (Costella *et al.*, 2025), enfrenta desafios em sua propagação clonal, limitando a produção em larga escala, especialmente sob condições ambientais adversas (Assis, 2015). Dentre os estresses abióticos mais prejudiciais, a salinização do solo destaca-se como uma ameaça crescente, intensificada pelas mudanças climáticas e atividades antrópicas (Ellouzi *et al.*, 2021; Ahmadzai *et al.*, 2025).

A exposição a elevadas concentrações salinas impõe dois estresses primários: osmótico, devido ao estresse hídrico (Mohamed *et al.*, 2022), e iônico, pela fitotoxicidade

do acúmulo de íons (Ullah *et al.*, 2023). Essa condição inicial desregula processos fisiológicos essenciais e leva ao estresse oxidativo celular, culminando na superprodução de espécies reativas de oxigênio (EROs), como H_2O_2 , radicais superóxido e hidroxila (Gelaw; Sanan-Mishra, 2024). O estresse oxidativo, por sua vez, danifica macromoléculas vitais (lipídios, proteínas e ácidos nucleicos). Particularmente nas fases de germinação e crescimento inicial, ocorrem alterações metabólicas e desequilíbrios tóxicos e nutricionais (Ben youssef *et al.* 2025), impactando severamente o crescimento e a produtividade das culturas (Ghosh *et al.*, 2025).

Nesse contexto, o condicionamento fisiológico de sementes é definido como uma técnica de hidratação controlada, suficiente para ativar o metabolismo pré-germinativo, mas interrompida antes que ocorra a protrusão da radícula (Shelar *et al.*, 2021). Essa estratégia é fundamental para uniformizar a germinação e elevar o vigor das plântulas (Harris *et al.*, 2001; Tania *et al.*, 2022). Adicionalmente, durante esse processo, a incorporação de agentes indutores ou soluções específicas pode promover melhorias fisiológicas e metabólicas (Diya; Beena; Jayalekshmy, 2024), modulando mecanismos de defesa e conferindo tolerância a estresses bióticos e abióticos (Dias *et al.*, 2025). Essa indução estabelece uma memória de estresse que otimiza as respostas a adversidades futuras (Liu *et al.*, 2022; Gelaw; Sanan-Mishra, 2024). Dentre os diversos métodos de condicionamento, destaca-se o condicionamento redox com H_2O_2 (Antonίου *et al.*, 2016). Esta molécula atua como uma sinalizadora chave na regulação do balanço redox e na ativação de respostas antioxidantes (Foyer, 2018; Kerchev *et al.*, 2020).

Estudos recentes demonstram que o condicionamento de sementes com peróxido de hidrogênio (H_2O_2) mitiga os efeitos do estresse salino (Elouzi *et al.*, 2021; Ameer *et al.*, 2025). Embora o H_2O_2 seja uma ERO, sua aplicação exógena em baixas concentrações funciona como uma molécula sinalizadora natural (Iqbal *et al.*, 2025). Esse pré-tratamento estimula vias de defesa, regula a expressão gênica e ativa enzimas antioxidantes (como SOD, CAT e APX), preparando as sementes para melhor tolerar estresses subsequentes e conferindo maior resiliência ao desenvolvimento inicial (Habib *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2012). Diante do exposto, o presente estudo teve como objetivo investigar os efeitos desse condicionamento fisiológico como H_2O_2 em sementes de *C. citriodora* sobre a tolerância ao estresse salino, buscando elucidar os mecanismos fisiológicos e bioquímicos associados.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Local do estudo e material vegetal

O experimento foi conduzido no Laboratório de Sementes Florestais (LSF) no Departamento de Ciências Florestais da Universidade Federal de Lavras (UFLA) - MG, em Lavras, Estado de Minas Gerais. As sementes de *Corymbia citriodora* foram obtidas no Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais (IPEF) – Lote RE0050N01/2020. As sementes colhidas em 2020 foram armazenadas em embalagem hermética em câmara entre 5-8°C / 45% UR.

2.2 Desenho experimental

O delineamento experimental foi o inteiramente casualizado, em um esquema fatorial 4x3, correspondendo a quatro concentrações de peróxido de hidrogênio - H₂O₂ (0, 100, 200 e 400 mM) e três níveis de salinidade, induzido por cloreto de sódio NaCl (0, 75 e 150 mM). Para cada tratamento, foram utilizadas cinco repetições, cada uma composta por 20 sementes. Os dados coletados foram submetidos ao teste de normalidade (Shapiro-Wilk), seguido de análise de variância pelo teste F com $p \leq 0,05\%$. Nos casos em que houve efeito significativo, foi aplicada à análise de variância (ANOVA) e, quando detectada diferença significativa, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de significância a ($p < 0,05$).

2.3 Preparação das sementes e estresse salino

O condicionamento fisiológico foi realizado pela imersão das sementes em tubos Falcon, cada um contendo 5 ml da solução de tratamento (H₂O₂) suficiente para cobrir totalmente as sementes. Os tratamentos foram: 0 mM (controle), 100 mM, 200 mM e 400 mM. Para garantir a aeração das sementes, os tubos foram mantidos em um agitador giratório (Roler Multifunctional Mixer), período definido por representar o final da fase de absorção rápida de água (Fase I) e o início da estabilização metabólica (Fase II), conforme a curva de embebição da espécie (Alcântara, 2012).

Após o condicionamento, as sementes foram lavadas em água corrente e, em seguida, secas por 24 horas em uma sala de secagem com circulação forçada de ar, mantida a 20 °C e 60% de umidade relativa (UR). O conteúdo de água foi determinado

antes e após o condicionamento a uma temperatura de 105° C por 48h, seguindo a metodologia de Brasil (2025). Por fim, ambas as sementes (condicionadas e não condicionadas) foram colocadas para germinar em condições de ausência de estresse (água destilada) ou sob as diferentes concentrações de NaCl.

O ensaio foi realizado em placas de Petri sobre papel filtro umedecido com soluções de NaCl em diferentes concentrações (0, 75 e 150 mM). As placas foram incubadas em câmara BOD a 25 °C, com fotoperíodo de 12 horas, durante 14 dias segundo (Brasil, 2025). A umidade do substrato foi mantida constante, com base nos critérios da International Seed Testing Association - Ista (2020).

2.4 Teste de Germinação

Para a avaliação da germinação utilizou-se como critério a protrusão da radícula ≥ 1 mm. As avaliações foram realizadas a cada 12 horas, por 14 dias seguindo os critérios de Brasil (2025). Com base nestes dados, foram calculados: o percentual de germinação (%G), índice de velocidade de germinação (IVG) (Maguire, 1962), tempo médio de germinação (TMG) segundo Santana e Ranal (2004), tempo médio para germinação e (T50) segundo Farooq *et al.* (2005).

2.4 Comprimento da raiz

Para cada tratamento, foram selecionadas aleatoriamente dez plântulas de *C. citriodora* para a mensuração do comprimento da raiz. As plântulas foram posicionadas sobre papel milimetrado (1 cm²) e fotografadas. Em seguida, o comprimento radicular foi medido em centímetros (cm) utilizando o software ImageJ.

2.6 Pigmentos fotossintéticos e Antocianinas

O teor de clorofilas e carotenoides foi determinado segundo Lichtenthaler (1987). Discos foliares (25 mg) foram imersos em 5 mL de dimetilsulfóxido (DMSO) e mantidos no escuro por 48 h. A absorvância dos extratos foi lida em triplicata em espectrofotômetro (Biospectro, SP-220), utilizando os comprimentos de onda de 665, 649 e 480 nm para o cálculo dos teores de clorofila *a*, *b* e carotenoides totais, conforme as equações de Wellburn (1994).

Para a quantificação de antocianinas, amostras de 25 mg de tecido foliar foram incubadas em 5 mL de metanol acidificado (HCl 1%) por 24 h a 4 °C (Kim et al., 2003). Após a extração, adicionou-se 200 µL de água e 200 µL de clorofórmio, seguido de centrifugação. A absorbância do sobrenadante foi determinada a 530 nm e 657 nm, e os resultados foram expressos em mg.g⁻¹ de massa fresca.

2.7 Atividade enzimática, peroxidação lipídica e peróxido de hidrogênio

Para a extração das enzimas antioxidantes foram macerados 150 mg de sementes em nitrogênio líquido com 10 mg de polivinilpolipirrolidona (PVP) e homogeneizados em 1,5 mL do tampão de extração 100 mM de fosfato de potássio, 0,1 mM de EDTA e 10 mM de ácido ascórbico. Os homogeneizados foram centrifugados a 12.000 rpm por 20 minutos, a 4 °C, coletando-se os sobrenadantes para as análises enzimáticas conforme apresentado por Biemelt, Keetman e Albrecht (1998).

A atividade da superóxido dismutase (SOD) foi estimada medindo-se a redução fotoquímica do nitroazul tetrazólio (NBT), conforme descrito Giannopolitis e Ries (1977). Para mensuração da atividade, foram adicionadas alíquotas de 10 µL ao meio de incubação composto por fosfato de potássio 50mM, pH 7.8, metionina 14mM, EDTA 0.1 µM, NBT 75µM e riboflavina 2µM e água destilada. Posteriormente, as microplacas foram iluminadas com lâmpada fluorescente de 20 W por sete minutos e a absorbância foi medida a 560 nm.

A atividade da ascorbato peroxidase (APX) foi estimada pela taxa de oxidação do ascorbato, conforme descrito por Nakano e Asada (1981). Resumidamente, foram adicionadas alíquotas 3 µL do sobrenadante ao meio de incubação contendo tampão fosfato de potássio 50 mM com pH 6.0, ácido ascórbico 0.8 mM e peróxido de hidrogênio 1 mM. O coeficiente de extinção molar foi 2.8 mM⁻¹ cm, e a densidade óptica foi lida a 290 nm.

A CAT foi avaliada, segundo Mengutay *et al.* (2013), em que uma alíquota de 2 µL do sobrenadante adicionadas ao meio de incubação, contendo tampão fosfato 45mM e pH 7.6, Na₂EDTA 0.1 mM dissolvido no tampão e peróxido de hidrogênio 10mM. A determinação dessa enzima foi obtida pelo decréscimo na absorbância a 240nm, a cada 15 segundos, por 3 minutos, monitorado pelo consumo de peróxido de hidrogênio. O coeficiente de extinção molar utilizado foi 36 mM⁻¹ cm⁻¹.

Para as análises do (MDA e H_2O_2) foram macerados 150 mg de sementes em nitrogênio líquido, homogeneizados em 1500 μ L de ácido tricloroacético (TCA) 0,1% (m/v) e centrifugados a 12000 g por 15 minutos a 4°C. O sobrenadante foi coletado e armazenado a -80°C, para posteriores análises.

A quantificação da peroxidação lipídica foi determinada de acordo com Buege e Aust (1978). Aliquotas do sobrenadante foram colocadas em microtubos ao meio de reação contendo 0,5% (m/v) de ácido tiobarbitúrico (TBA) e 10% (m/v) de TCA. Em seguida, o meio foi incubado a 95°C, por 30 minutos, paralisando a reação por resfriamento rápido em gelo e realizada as leituras a 535nm e 600nm em microplacas de microtitulação de 96 poços. Os resultados foram expressos em mmol de MDA por grama de peso fresco (MDA.g-1MF).

A quantificação do peróxido de hidrogênio foi realizada conforme (Velikova; Yordanov; Edreva, 2000). Aliquotas do sobrenadante foram adicionados ao meio de reação composto por tampão fosfato de potássio 10 mM (KH_2PO_4) ajustado para pH 7,0 e 90 μ L de iodeto de potássio 1 M (KI). Foi realizada a leitura da absorbância das amostras a 390 nm, em triplicatas com base na curva padrão de concentrações de H_2O_2 conhecidas.

Tendo-se em vista que não foram observadas diferenças significativas nos testes de germinação comparando-se o condicionamento em diferentes concentrações de peróxido de hidrogênio, optou-se por utilizar a concentração de 100 mM para as análises enzimáticas. Para isolar o efeito do H_2O_2 , incluiu-se também o hidrocondicionamento como tratamento comparativo. Para isso, sementes foram condicionadas em água destilada nas mesmas condições.

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado (DIC) com arranjo fatorial (2×4) +1. Os tratamentos consistiram em dois agentes de condicionamento (água destilada e H_2O_2 100 mM), quatro tempos de embebição (5, 10, 15 e 20 h), e um controle adicional com sementes não condicionadas. O condicionamento ocorreu nas mesmas condições supracitadas no item (2.3). Após o preparo, as sementes foram secas por 24h em câmara com condições controladas (20 °C e 60% de UR) até atingirem o grau de umidade original e, em seguida, armazenadas a -80 °C. As determinações de atividade enzimática, peroxidação lipídica e H_2O_2 foram realizadas em

triplicata. Os dados foram submetidos à ANOVA fatorial, e as médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste de Dunnett ($p \leq 0,05$).

3. RESULTADOS

3.1 Germinação de sementes de *Corymbia citriodora*

A análise de variância indicou que a interação entre peróxido de hidrogênio e salinidade não foi significativa ($P > 0,05$), para os parâmetros avaliados (Tabela 1). Desta forma, os efeitos desses fatores são observados de forma isolada.

Embora o condicionamento das sementes em H_2O_2 não tenha alterado a porcentagem final de germinação, o tratamento promoveu uma aceleração geral do processo germinativo. Esse vigor foi evidenciado pelo aumento significativo do Índice de Velocidade de Germinação (IVG) e pela redução simultânea do Tempo Médio de Germinação (TMG) e do tempo para 50% de germinação (T50). Notavelmente, as sementes preparadas com 400 mM de H_2O_2 destacou-se por reduzir o T50 em 31,8% em comparação às sementes não tratadas (Controle) (Tabela 1).

Tabela 1. Efeitos do peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e cloreto de sódio (NaCl) na germinação, tempo médio de germinação, índice de velocidade de germinação e T50% de sementes de *C. citriodora*. Os fatores estão representados de forma independente na tabela com média \pm desvio padrão e letras minúsculas diferentes na mesma coluna indicam diferenças significativas entre os tratamentos com $p < 0,05$.

Fator	Nível	Germinação	TMG (h)	IVG	T50 (h)
H ₂ O ₂ (mM)	0	83 \pm 0,88 a	90 \pm 1,10 a	0,208 \pm 0,02 b	93 \pm 2,68 a
	100	90 \pm 0,59 a	79 \pm 0,80 b	0,259 \pm 0,02 a	77 \pm 3,56 b
	200	87 \pm 0,79 a	78 \pm 0,78 b	0,257 \pm 0,02 a	77 \pm 3,65 b
	400	85 \pm 1,00 a	78 \pm 0,86 b	0,266 \pm 0,03 a	63 \pm 2,52 c
NaCl (mM)	0	96 \pm 0,22 a	54 \pm 1,27 a	0,367 \pm 0,009 a	54 \pm 1,17 c
	75	90 \pm 0,43 b	76 \pm 1,70 b	0,245 \pm 0,008 b	69 \pm 2,28 b
	150	72 \pm 0,84 c	114 \pm 1,97 c	0,133 \pm 0,008 c	103 \pm 2,45 a

FONTE: Do autor (2026)

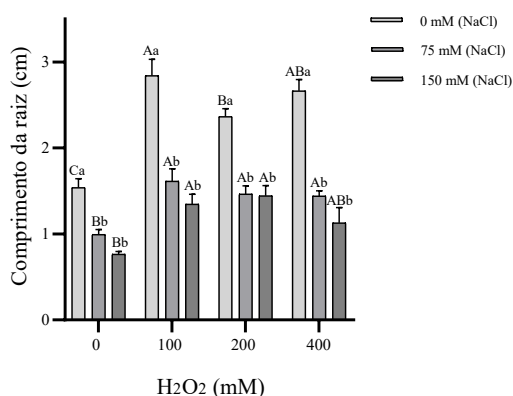
Os parâmetros de germinação foram significativamente afetados pelo estresse salino ($P < 0,05$), reduzindo a germinação final e a velocidade de germinação. Os valores máximos de TMG e T50 (103h), bem como os valores mínimos de germinação final (72%) e IVG, foram observados em sementes submetidas ao estresse salino mais severo (150

mM NaCl). Em contrapartida, os valores máximos de germinação (98%) e mínimos de T50 (54h) foram registrados em sementes não tratadas. A exposição à concentração de 150 mM reduziu a germinação final e o IVG em 26,5% e 62,2%, respectivamente, enquanto aumentou o TMG em 95% e o T50 em 90,3% em relação ao controle.

3.2 Comprimento da raiz

O comprimento de raiz foi significativamente influenciado ($P < 0,05$) pela interação entre o condicionamento e a salinidade (Figura 3). Na ausência de salinidade, o H_2O_2 promove maior desenvolvimento radicular, com valores máximos de comprimento (2,8 cm) registrados nas plântulas condicionadas com 100 mM, superando estatisticamente o controle (Fig. 3A). Inversamente, os valores mínimos foram observados nas sementes não condicionadas submetidas ao estresse severo (150 mM NaCl), onde foi observada redução do crescimento radicular. No entanto, o condicionamento atenuou esse efeito inibitório. Em condições de estresse salino (75 e 150 mM), as plântulas oriundas de sementes tratadas com H_2O_2 (independente da dose) apresentaram comprimento radicular significativamente superior às não tratadas, demonstrando o efeito protetor do condicionamento na mitigação do estresse (Fig. 3B).

Figura 1. Efeito do condicionamento com H_2O_2 e estresse salino no comprimento radicular *C. citriodora*. Médias seguidas por letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% (Maiúsculas: H_2O_2 ; Minúsculas: NaCl). Barras verticais representam o desvio padrão da média (Figura 1)



FONTE: Do autor (2026)

Figura 2. Eficácia comparativa do condicionamento com H_2O_2 na mitigação do estresse salino durante o estabelecimento inicial de plântulas de *Corymbia citriodora*. A figura apresenta uma visão comparativa do alongamento radicular ao final do teste de

germinação. Os painéis exibem plântulas representativas dos diferentes grupos de tratamento: sementes sem condicionamento prévio (controle); sementes não condicionadas germinadas sob estresse salino (75 e 150 mM); sementes condicionadas com H₂O₂ nas concentrações de 100, 200 e 400 mM, posteriormente submetidas ao estresse salino.



FONTE: Do autor (2026)

3.3 Teor de pigmentos fotossintéticos

A análise de variância não indicou interação significativa ($P > 0,05$) entre H₂O₂ e NaCl para as variáveis bioquímicas. Dessa forma, os efeitos principais são descritos de forma isolada.

O condicionamento das sementes com H₂O₂ não alterou significativamente os teores de clorofila *a*, clorofila *b*, carotenoides e relação *a/b*, cujos valores médios permaneceram estatisticamente constantes entre os tratamentos (Fig. 4A-D). Em contraste, o acúmulo de antocianinas variou significativamente ($P < 0,05$) em resposta ao H₂O₂. Os valores máximos de antocianinas foram observados nas plântulas originadas de sementes tratadas com 100 mM, enquanto os valores mínimos foram registrados no controle e na dose de 400 mM, que não diferiram entre si (Fig. 4E). O tratamento com

100 mM promoveu um incremento de 37% no conteúdo de antocianinas em comparação às sementes não tratadas.

Tabela 2. Efeito do peróxido de hidrogênio H_2O_2 e estresse salino no teor de pigmentos em plântulas de *C. citriodora*, clorofila *a*, clorofila *b*, carotenoides, relação clorofila *a/b* e Antocianinas. Médias seguidas por letras diferentes são significativamente diferentes ($P \leq 0,05$), conforme determinado pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Barras verticais representam o erro padrão da média.

Fator	Nível	Concentração (mg/g MF)				
		Clorofila <i>a</i>	Clorofila <i>b</i>	Carotenoides	Reação cl <i>a/b</i>	Antocianinas
H_2O_2 (mM)	0	0,3676 ± 0,027 a	0,0922 ± 0,008 a	0,0826 ± 0,005 a	4,1000 ± 0,181 a	0,9290 ± 0,050 b
	100	0,3329 ± 0,023 a	0,0837 ± 0,009 a	0,0774 ± 0,003 a	4,2500 ± 0,379 a	1,2700 ± 0,059 a
	200	0,3845 ± 0,049 a	0,1179 ± 0,021 a	0,0813 ± 0,005 a	3,5900 ± 0,320 a	1,0700 ± 0,049 ab
	400	0,3252 ± 0,029 a	0,0921 ± 0,013 a	0,0732 ± 0,006 a	3,9900 ± 0,483 a	0,9350 ± 0,056 b
NaCl (mM)	0	0,4597 ± 0,018 a	0,1347 ± 0,011 a	0,0963 ± 0,001 a	3,5600 ± 0,146 b	1,0800 ± 0,069 a
	75	0,3277 ± 0,017 b	0,0929 ± 0,005 b	0,0774 ± 0,003 b	3,5400 ± 0,066 b	1,0000 ± 0,061 a
	150	0,2701 ± 0,017 c	0,0619 ± 0,005 c	0,0633 ± 0,003 c	4,8500 ± 0,409 a	1,0700 ± 0,052 a

FONTE: Do autor (2026)

O estresse salino resultou em uma redução significativa ($P < 0,05$) no conteúdo de pigmentos fotossintéticos (Figura 5). Os valores máximos de clorofila *a*, clorofila *b* e carotenoides foram registrados nas condições controle, enquanto os valores mínimos foram observados nas plântulas submetidas à maior concentração salina (150 mM NaCl) (Fig. 5A-C). Inversamente, a relação clorofila *a/b* atingiu seu valor máximo sob estresse severo, sugerindo maior estabilidade da clorofila *a* em relação à *b* (Fig. 5D). O conteúdo de antocianinas manteve-se estatisticamente constante ($P > 0,05$) independente da concentração de sal (Fig. 5E). A exposição a 150 mM de NaCl resultou em uma redução de 38% na clorofila *a*, acompanhada por decréscimos proporcionais nos demais pigmentos em comparação ao controle.

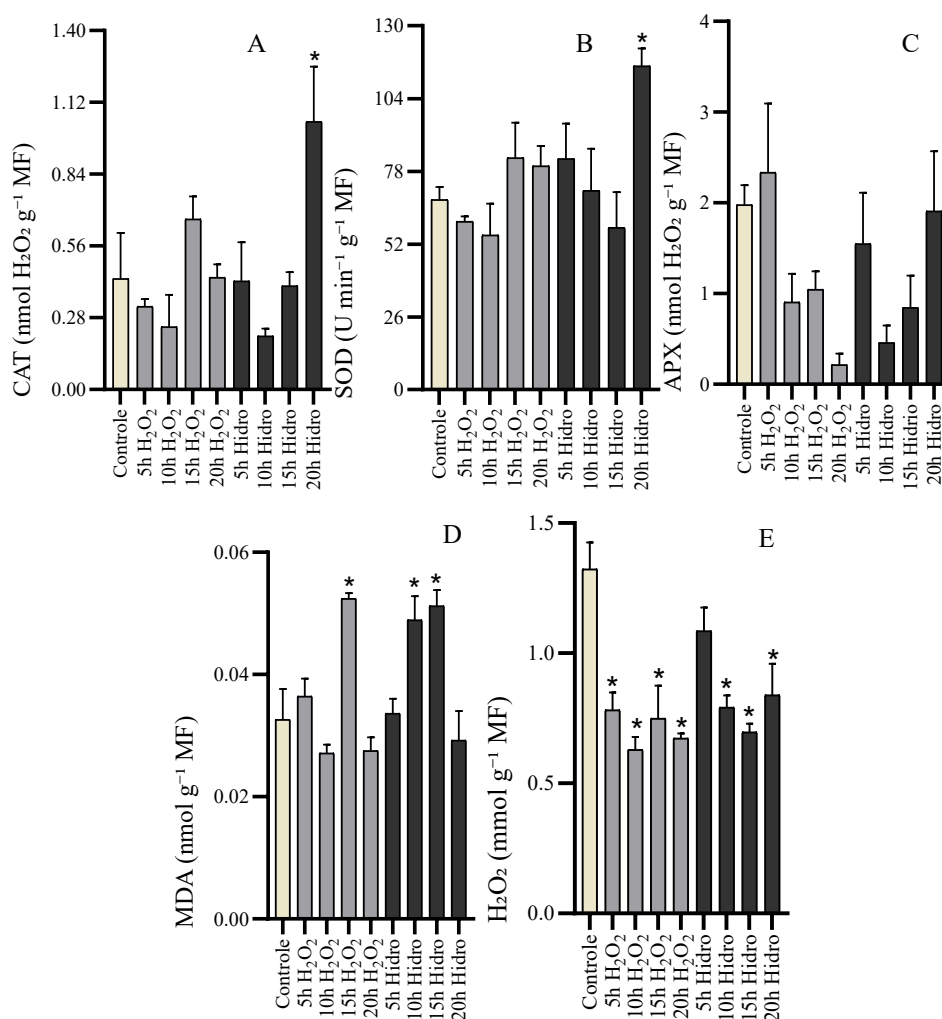
3.4 Atividade enzimática, peroxidação lipídica e peróxido de hidrogênio

A resposta do sistema enzimático antioxidante aos tratamentos de condicionamento mostrou-se altamente específica (Figura 6). Em sementes condicionadas com H_2O_2 e sob hidrocondicionamento, observou-se um aumento nas atividades da superóxido dismutase (SOD) e da catalase (CAT), sendo este efeito

significativo ($P < 0,05$) apenas após 20 h de hidrocondicionamento em comparação ao controle (Fig. 6A e 6C). A atividade da ascorbato peroxidase (APX) apresentou valores geralmente baixos, embora a atividade tenha sido significativamente aumentada ($P < 0,05$) em sementes condicionadas por 5 h com H_2O_2 , este efeito não foi observado nos demais tratamentos (Fig. 6B).

A integridade das membranas celulares, avaliada pelo conteúdo de malondialdeído (MDA), revelou que uma elevação significativa ocorreu apenas em sementes condicionadas por 15 h com H_2O_2 , enquanto o condicionamento com H_2O_2 por 10 e 20 h não diferiram significativamente do controle (Fig. 6D). Já sementes hidrocondicionadas por 10 e 15 h mostraram um aumento significativo no conteúdo de MDA (Fig. 6D). Esse aumento no dano oxidativo em alguns tratamentos ocorreu em situação em que se observou redução dos níveis de peróxido de H_2O_2 . As sementes condicionadas com H_2O_2 por 5, 10, 15 e 20 h e sob hidrocondicionamento por 10, 15 e 20 h apresentaram reduções significativas nos níveis de H_2O_2 em comparação às sementes não tratadas (controle), sendo os tratamentos de 5 h e 10 h com H_2O_2 os que mostraram as maiores reduções, com diminuições aproximadas de 41% e 52%, respectivamente (Fig. 6E).

Figura 3. Atividade das enzimas antioxidantes SOD (A), APX (B) e CAT (C), peroxidação lipídica (MDA) (D) e H_2O_2 endógeno (E) em sementes condicionadas de *C. citriodora*. As barras verticais indicam o erro padrão da média. Asteriscos (*) indicam diferença significativa em relação ao controle (Dunnett, $p < 0,05$).



FONTE: Do autor (2026)

4. DISCUSSÃO

O período entre a germinação e o estabelecimento inicial é crucial para as plantas, tendo-se em vista que são altamente vulneráveis a estresses ambientais (Sajeev *et al.*, 2024). Nossos resultados demonstram o papel do peróxido de hidrogênio (H₂O₂) e da salinidade na germinação de sementes de *C. citriodora*. O preparo das sementes com H₂O₂ não impactou a viabilidade final, mas foi capaz de aumentar a velocidade de germinação avaliada pelos índices de vigor como o TMG, IVG e T50 (Tabela 1). Isso sugere que sementes pré-tratadas com H₂O₂ completam rapidamente as fases iniciais da germinação (Ellouzi *et al.*, 2021), promovendo uma prontidão metabólica para o rápido estabelecimento das plântulas (Ahmadvand *et al.*, 2012). Tal aceleração é consistente com observados em culturas como, *Zea mays* e *Nicotiana tabacum* (Gelaw; Sanan-Mishra, 2024; Villagomez-Aranda *et al.*, 2024). Tais efeitos derivam, provavelmente, pela ativação de sistemas antioxidantes, homeostase osmótico e modulação gênica,

preparando a semente para um estabelecimento mais vigoroso (Santos Guaraldo *et al.*, 2023; Villagomez-Aranda *et al.*, 2024).

O *C. citriodora* é altamente sensível a salinidade durante a fase da germinação. A exposição a 75 e 150 mM de NaCl inibiu significativamente a germinação final e os índices de vigor (TMG, IVG e T50) (Tabela 1), o que está de acordo padrões observados em sementes de *Phaseolus vulgaris* e *Solanum melongena*, nos quais o estresse salino atua como um agente tóxico (Tania *et al.*, 2022; Jawaid *et al.*, 2025). O efeito inibitório é atribuído a redução do potencial osmótico da solução externa, o que restringe a absorção de água necessária para embebição e reativação metabólica (Santos Guaraldo *et al.*, 2023; Jameel *et al.*, 2024). Adicionalmente, altas concentrações de NaCl que induzem toxicidade iônica, por meio do acúmulo excessivo de Na⁺ e Cl⁻, o que provoca distúrbios metabólicos severos, incluindo inibição enzimática, danos à integridade de membranas e estresse oxidativo, o que compromete a viabilidade embrionária (Alzahib *et al.*, 2021). Esse padrão de resposta é amplamente documentado em espécies sensíveis, como *Pisum sativum* e *Helianthus annuus* L (Liu *et al.*, 2024; Farooq *et al.*, 2025).

O sistema radicular, interface primária com o solo, sofre intensamente os efeitos deletérios da salinidade (Sarkar *et al.*, 2018). Os resultados obtidos no presente estudo confirmam essa vulnerabilidade, em que a exposição a 75 e 150 mM suprimiu significativamente o comprimento da raiz. No entanto, o condicionamento com H₂O₂ nas concentrações de (100, 200 e 400 mM) mitigou significativamente esses danos, restaurando o crescimento a níveis comparáveis ou superiores ao controle (Figura 1). Essa recuperação pode estar associada a germinação mais rápida conferida pelo condicionamento, que propicia as plântulas uma vantagem para estabelecer um sistema radicular robusto (Ellouzi *et al.*, 2021).

A manutenção do crescimento sob estresse ocorre via otimização da homeostase iônica, mediada pela ativação de vias de sinalização, como a *Salt Overly Sensitive* (SOS) (Barba-Espín *et al.*, 2012). Esse sistema regula transportadores gerenciam o influxo e o efluxo de íons, mantendo a homeostase celular (Usman *et al.*, 2025). Entre os mecanismos-chave destacados na literatura estão a exclusão de Na⁺ do citoplasma pelo transportador SOS1 (Usman *et al.*, 2025), a manutenção do K⁺ via onde transportadores como o HKT1 auxiliam no equilíbrio iônico (Dave; Argarwal; Agarwal, 2022), e a compartimentalização vacuolar do Na⁺, realizada pelo antiportador NHX1 (Usman *et al.*, 2025).

Essa compartimentalização é crucial para evitar a interrupção dos processos celulares, protegendo as atividades enzimáticas e metabólicas no citoplasma sensíveis ao sódio (Usman *et al.*, 2025). Embora as concentrações de Na^+ e Cl^- não tenham sido mensuradas neste estudo, trabalhos anteriores indicam que o H_2O_2 promove a exclusão íons tóxicos e aumenta a retenção de K^+ nas raízes, (Jamshidi Goharrizi *et al.*, 2024), melhorando a razão K^+ / Na^+ , um indicador chave da tolerância ao sal (Silva *et al.*, 2019). Essa eficácia do H_2O_2 corrobora as descobertas em que esse agente condicionante melhorou significativamente o comprimento radicular de culturas com *Zea mays* e *Vigna-unguiculata*, sob estresse salino (Villagomez-Aranda *et al.*, 2024; Pessoa *et al.*, 2025), reforçando que o efeito ocorre via sinalização redox, preparando a planta para respostas mais eficientes ao estresse (Hossain *et al.*, 2015).

A salinidade induz a degradação da clorofila via ativação de clorofilases e peroxidação lipídica das membranas tilacoides (Masud *et al.*, 2026). Em nosso estudo, o estresse salino reduziu significativa os pigmentos fotossintéticos, causando uma queda de 41,2% clorofila *a*, 54,0% para clorofila *b* e 34,3% para carotenoides, sob 150 mM de NaCl (Tabela 2). Esses achados corroboram resultados em culturas de *Phaseolus vulgaris*, *Brassica oleracea* e *Helianthus annuus*, nos quais a salinidade comprometeu a aparato fotossintético (Tania *et al.*, 2022; Shalaby *et al.*, 2023; Farooq *et al.*, 2025). Tal degradação está associada toxicidade iônica, danos oxidativos e inibição da biossíntese desses pigmentos (Siddiqui *et al.*, 2020), resultando em perda da integridade da clorofila, desequilíbrio na função estomática (Khan *et al.*, 2015), inibindo a absorção de magnésio, elemento essencial para a síntese desses pigmentos (Acosta-Motos *et al.*, 2017).

Embora H_2O_2 tenha atenuado na redução do crescimento radicular sob estresse salino, não foi capaz de mitigar a degradação dos pigmentos fotossintéticos induzida pela salinidade. Contrastando com estudos em milho e tomate, nos quais o condicionamento com H_2O_2 conferiu proteção ao aparato fotossintético (Araújo *et al.*, 2021; Saisi *et al.*, 2024). A ausência de interação significativa entre os fatores sugere que, em *C. citriodora*, sob as condições experimentais adotadas, os mecanismos de proteção desencadeados pelo H_2O_2 estão predominantemente associados à manutenção do vigor germinativo e do crescimento radicular, e não à preservação do aparato fotossintético.

Apesar da falta de efeito protetor sobre os teores de pigmentos totais, o aumento de 36,2% na razão $\text{Cl } a/b$ sob concentração de 150 mM NaCl sugere uma reorganização estrutural adaptativa (Tabela 2). Esse incremento em condições de salinidade severa

indicar uma redução preferencial do complexo de captação de luz II (LHCII) (Miao *et al.*, 2020), atuando como mecanismo fotoprotetor para evitar danos ao centro de reação (Wiciarz *et al.*, 2015). Em contrapartida, a redução dessa razão em sementes pré-condicionadas com 200 mM de H₂O₂, sem estresse salino, sugere uma estratégia de otimização da captação de luz.

Embora o pré-condicionamento com H₂O₂ não tenha preservado o aparato fotossintético sob estresse, ele exerceu, um efeito notável sobre os pigmentos secundários. Observou-se um aumento de 37% no conteúdo de antocianinas na concentração de 100 Mm de H₂O₂ em relação ao controle (Tabela 2). Essas moléculas, fundamentais pelo seu potencial antioxidante (Nguyen, 2020), exibiram uma clara resposta hormética ao H₂O₂. hormese caracteriza-se por uma relação dose-resposta bifásica, onde baixas concentrações de um agente estressor estimulam respostas de defesa, enquanto doses elevadas tornam-se inibitórias (Volkova; Bondarenko; Kazakova, 2022). Neste presente estudo, o maior acúmulo de antocianinas induzido pela menor dosagem corrobora resultados obtidos em *Zea mays* sob diferente tipo de estresse (Gelaw; Sanan-Mishra, 2024), reforçando o papel do H₂O₂ como uma molécula sinalizadora redox crucial (Smirnoff; Arnaud, 2019; Fu *et al.*, 2023).

Em contraste com o efeito do H₂O₂, a exposição às diferentes doses de NaCl não induziu alterações significativas na concentração de antocianinas. Achados semelhantes foram relatados em genótipos de *Oryza sativa* tolerantes ao sal (Nounjan; Theerakulpisut, 2021). Esses resultados sugerem que *C. citriodora* apresenta maior sensibilidade aos sinais redox endógenos do que aos distúrbios iônico-osmóticos provocados pelo estresse salino (Farooq *et al.*, 2021), além de empregar mecanismos de tolerância aos diferentes níveis de sal para excluir íons Na⁺, promovendo ajuste osmótico (Dabravolski; Isayenkov, 2023). Isso demonstra que, para *C. citriodora*, as antocianinas não desempenharam papel vital na tolerância ao estresse salino, possivelmente devido à adoção de outras estratégias de regulação da sua produção sob diferentes concentrações de sal (Li *et al.*, 2022)

O estresse salino perturba a homeostase redox celular, através da produção de espécies reativas de oxigênio (EROs) (Irin; Hasanuzzaman, 2024). Para mitigar o estresse oxidativo resultante, as plantas ativam sistemas de defesa antioxidante, notadamente as enzimas superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT) e ascorbato peroxidase (APX) (Kaya *et al.*, 2020), essenciais na eliminação das desses radicais (Parihar *et al.*, 2015). Em nosso estudo, o pré-tratamento das sementes com 100 mM de H₂O₂ acelerou a

germinação e os parâmetros de vigor (Tabela 1), e mitigou os efeitos salinidade no crescimento radicular (figura 1). Restaurando a homeostase redox e danos oxidativos aos lipídios (Bhattacharjee, 2012).

Contudo, este tratamento não resultou em uma regulação positiva significativa da atividade de SOD, CAT e APX (Figura 3 A/B/C), contrastando com o padrão amplamente descrito na literatura, no qual o H_2O_2 atua como molécula sinalizadora capaz de induzir a ativação do sistema antioxidante em sementes de *Oryza sativa*, *Zea mays*, *Vigna unguiculata*, *Pisum sativum* e *Vigna unguiculata* (Bhattacharjee, 2012; Gelaw; Sanan-Mishra, 2024; Pessoa *et al.*, 2025; Afzal *et al.*, 2025; Masud *et al.*, 2026). Por outro lado, hidrocondicionamento (20h) elevou significativamente a atividades de SOD e CAT (figura 3 A/B), assemelhando-se aos resultados observados em *Gossypium hirsutum*, onde o condicionamento hídrico modulou eficientemente o sistema antioxidante (Santos Guaraldo *et al.*, 2023).

A ausência de resposta da APX a qualquer um dos agentes condicionantes (Figura 3C) pode ser explicada por sua sensibilidade ao próprio substrato; concentrações elevadas de H_2O_2 podem levar à inativação da enzima (Hiner *et al.*, 2000; Rady *et al.*, 2025). Além disso, a regulação da APX envolve múltiplas isoformas compartimentadas no citosol, mitocôndrias e cloroplastos (Mishra *et al.*, 2023), que podem apresentar padrões de expressão diferenciais e espécie-específicos sob estresse (Rosa *et al.*, 2010).

Embora o tratamento com 100 mM de H_2O_2 tenha sido benéfico para o vigor inicial, o pré-condicionamento por períodos mais longos (15h) exerceu efeito deletério, elevando a peroxidação lipídica e os danos às membranas, conforme indicado pelo acúmulo de malondialdeído (MDA) (Figura 3D) contrastando com resultados Ellouzi *et al.*, 2021; Masud *et al.*, 2026. Esse comportamento também foi observado no hidrocondicionamento de 10h e 15h, divergindo do relatado para (Santos Guaraldo *et al.*, 2023). Curiosamente, apesar da baixa indução enzimática e da persistência da peroxidação lipídica em alguns tratamentos, houve uma redução sistemática do teor de H_2O_2 endógeno em comparação ao controle (Figura 3E). Isso sugere que o condicionamento promove uma "memória metabólica" que favorece a homeostase iônica e o ajuste osmótico, estabelecendo um equilíbrio redox eficiente sem necessariamente demandar uma indução expressiva do aparato enzimático tradicional (Ellouzi *et al.*, 2021; Jameel *et al.*, 2024; Gelaw; Sanan-Mishra, 2024; Afzal *et al.*, 2025).

Os resultados obtidos com *C. citriodora* alinham-se a diversos estudos na literatura, reiterando que o condicionamento de sementes com H₂O₂ é uma ferramenta essencial na mitigação dos efeitos deletérios da salinidade. Evidências em culturas como *Zea mays*, *Pisum sativum* e *Vigna unguiculata* demonstram que o H₂O₂ não apenas acelera a germinação e os parâmetros de vigor, mas também exerce forte influência na manutenção do crescimento radicular sob estresse (Gelaw; Sanan-Mishra, 2024; Pessoa *et al.*, 2025; Masud *et al.*, 2026). Nossos dados sugerem que, para *C. citriodora*, o condicionamento com H₂O₂ é suficiente para desencadear adaptações fisiológicas fundamentais. Esse processo ocorre possivelmente por meio de ajustes osmóticos e da exclusão seletiva de íons tóxicos, favorecendo uma germinação e um estabelecimento inicial de plântulas mais eficientes. Ao atuar como molécula sinalizadora, o H₂O₂ ativa mecanismos de defesa que preservam a integridade das membranas celulares, conferindo à espécie uma maior tolerância à salinidade.

5. CONCLUSÃO

O presente estudo demonstra que o condicionamento de sementes com H₂O₂ (100, 200 e 400 mM) é uma estratégia eficaz para aumentar a tolerância à salinidade em plântulas de *C. citriodora*. Nossos resultados indicam que este agente de condicionamento não apenas acelerou a germinação e melhorou os índices de vigor, mas também mitigou ativamente os efeitos deletérios do estresse salino (75 e 150 mM), mantendo o crescimento radicular e ativando respostas fotoprotetoras, como o incremento no teor de antocianinas.

REFERENCIAS

ACOSTA-MOTOS, J. R. *et al.* Plant responses to salt stress: adaptive mechanisms. **Agronomy**, v. 7, n. 1, p. 18, 2017.

AFZAL, M. K. *et al.* Nitric Oxide and Hydrogen Peroxide Coordinate to Improve Photosynthesis, Oxidative Defense, Osmoregulation, and Ions Homeostasis in Pea (*Pisum sativum* L.) Under Drought. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 25, n. 2, p. 2534-2558, 2025.

AHMADVAND, G. *et al.* Effect of seed priming with potassium nitrate on germination and emergence traits of two soybean cultivars under salinity stress conditions. **American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences**, v. 12, n. 6, p. 769-774, 2012.

AHMADZAI, A. S. *et al.* Mechanisms of anthocyanin-mediated salt stress alleviation and cellular homeostasis in plants. **Plant Growth Regulation**, p. 1-19, 2025.

ALCÂNTARA, N. V. Condicionamento Osmótico em sementes de *Corymbia citriodora* (Hook.) KD Hill & LAS Johnson. 2012.

ALZAHIB, R. H. *et al.* Assessment of morpho-physiological, biochemical and antioxidant responses of tomato landraces to salinity stress. **Plants**, v. 10, n. 4, p. 696, 2021.

AMEER, A *et al.* Impacts of Ellagic Acid and Hydrogen Peroxide on Wheat (*Triticum aestivum*) Physiological Attributes Under Saline Stress: A Seed Priming Approach. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 211, n. 3, p. e70074, 2025.

AMOR, N. B. *et al.* Physiological and antioxidant responses of the perennial halophyte *Crithmum maritimum* to salinity. **Plant Science**, v. 168, n. 4, p. 889-899, 2005.

ANJUM, N. A. *et al.* Catalase and ascorbate peroxidase—representative H₂O₂-detoxifying heme enzymes in plants. **Environmental science and pollution research**, v. 23, n. 19, p. 19002-19029, 2016.

ANTONIOU, C. *et al.* Unravelling chemical priming machinery in plants: the role of reactive oxygen–nitrogen–sulfur species in abiotic stress tolerance enhancement. **Current opinion in plant biology**, v. 33, p. 101-107, 2016.

ARAÚJO, G. *et al.* H₂O₂ priming promotes salt tolerance in maize by protecting chloroplasts ultrastructure and primary metabolites modulation. **Plant Science**, v. 303, p. 110774, 2021.

ASSIS, T. F. Melhoramento genético de Eucalyptus: desafios e perspectivas. *In: ENCONTRO BRASILEIRO DE SILVICULTURA*, 3., 2015, Campinas. **Anais...** Campinas: [s.n.], 2015. p. 127-148.

BARBA-ESPÍN, G.; HERNÁNDEZ, J. A.; DIAZ-VIVANCOS, P. Role of H₂O₂ in pea seed germination. **Plant signaling & behavior**, v. 7, n. 2, p. 193-195, 2012.

BEN YOUSSEF, R *et al.* Salicylic acid seed priming: A key frontier in conferring salt stress tolerance in barley seed germination and seedling growth. **Agronomy**, v. 15, n. 1, p. 154, 2025.

BIEMELT, S.; KEETMAN, U.; ALBRECHT, G. Re-aeration following hypoxia or anoxia leads to activation of the antioxidative defense system in roots of wheat seedlings. **Plant Physiology**, v. 116, n. 2, p. 651-658, 1998.

Brasil. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. *Regras para Análise de Sementes – RAS*. Brasília: MAPA/SDA, 2025. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/arquivos-publicacoes-insumos/2946_regras-analise__sementes.pdf. Acesso em: 15 nov. 2025.

BUEGE, J. A.; AUST, S. D. Microsomal lipid peroxidation. *In: Methods in Enzymology*. Academic Press, 1978. v. 52, p. 302-310.

- COSTELLA, C. *et al.* Mini-tunnel and season influence in clonal garden on the production of clonal seedlings for two subtropical clones: *Eucalyptus saligna* and *Corymbia torelliana* × *Corymbia citriodora*. **iForest-Biogeosciences and Forestry**, v. 18, n. 3, p. 154, 2025.
- DABRAVOLSKI, S. A.; ISAYENKOV, S. V. The role of anthocyanins in plant tolerance to drought and salt stresses. **Plants**, v. 12, n. 13, p. 2558, 2023.
- DAVE, A.; AGARWAL, P.; AGARWAL, P. K. Mechanism of high affinity potassium transporter (HKT) towards improved crop productivity in saline agricultural lands. **3 Biotech**, v. 12, n. 2, p. 51, 2022.
- DIAS, G. F. *et al.* Seed Priming with PEG 6000 and Silicic Acid Enhances Drought Tolerance in Cowpea by Modulating Physiological Responses. **Horticulturae**, v. 11, n. 4, p. 438, 2025.
- DIYA, A.; BEENA, R.; JAYALEKSHMY, V. G. Physiological, Biochemical and Molecular Mechanisms of seed priming: a review. **Legume Research**, v. 47, n. 2, p. 159-166, 2024.
- ELLOUZI, H. *et al.* H₂O₂ seed priming alleviates subsequent salt stress by preventing ROS production and amplifying antioxidant defense in cauliflower seeds and seedlings. **Scientia Horticulturae**, v. 288, p. 110360, 2021.
- FAROOQ, M. *et al.* Thermal hardening: a new seed vigor enhancement tool in rice. **Journal of Integrative Plant Biology**, v. 47, n. 2, p. 187-193, 2005.
- FAROOQ, U.; ASHRAF, M. A.; RASHEED, R. Citrulline enhances salinity tolerance via photosynthesis, redox balance, osmotic and hormonal regulation, and nutrient assimilation in sunflower (*Helianthus annuus* L.). **Physiology and Molecular Biology of Plants**, v. 31, n. 6, p. 1027-1052, 2025.
- FOYER, C. H. Reactive oxygen species, oxidative signaling and the regulation of photosynthesis. **Environmental and experimental botany**, v. 154, p. 134-142, 2018.
- FU, Z.-W. *et al.* Salt stress-induced chloroplastic hydrogen peroxide stimulates pdTPI sulfenylation and methylglyoxal accumulation. **The Plant Cell**, v. 35, n. 5, p. 1593-1616, 2023.
- GELAW, Y.; SANAN-MISHRA, N. Molecular priming with H₂O₂ and proline triggers antioxidant enzyme signals in maize seedlings during drought stress. **Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - General Subjects**, v. 1868, n. 7, p. 130633, 2024.
- GHOSH, T *et al.* Hormonal signaling at seed germination and seedling stage of plants under salinity stress. **Plant Growth Regulation**, p. 1-18, 2025.
- GIANNOPOLITIS, C. N.; RIES, S. K. Superoxide dismutases: I. Occurrence in higher plants. **Plant Physiology**, v. 59, n. 2, p. 309-314, 1977.
- HABIB, N. *et al.* Use of nitric oxide and hydrogen peroxide for better yield of wheat (*Triticum aestivum* L.) under water deficit conditions: growth, osmoregulation, and antioxidative defense mechanism. **Plants**, v. 9, n. 2, p. 285, 2020.

HANACHI, S.; VAN LABEKE, M. C.; MEHOUACHI, T. Application of chlorophyll fluorescence to screen eggplant (*Solanum melongena* L.) cultivars for salt tolerance. **Photosynthetica**, v. 52, n. 1, p. 57-62, 2014.

HINER, A. N. P. *et al.* Kinetic study of the inactivation of ascorbate peroxidase by hydrogen peroxide. **Biochemical Journal**, v. 348, n. 2, p. 321-328, 2000.

HOSSAIN, M. A. *et al.* Hydrogen peroxide priming modulates abiotic oxidative stress tolerance: insights from ROS detoxification and scavenging. **Frontiers in Plant Science**, v. 6, p. 420, 2015.

HUSSAIN, I. *et al.* Seed priming improves the performance of poor-quality wheat seed. **International Journal of Agriculture and Biology**, v. 15, n. 6, p. 1151-1156, 2013.

HUSSAIN, M.; FAROOQ, M.; LEE, D.-J. Evaluating the role of seed priming in improving drought tolerance of pigmented and non-pigmented rice. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 203, n. 4, p. 269-276, 2017.

INTERNATIONAL SEED TESTING ASSOCIATION. **International Rules for Seed Testing 2020: Introduction to the ISTA Rules Chapters 1-19**. Bassersdorf: ISTA, 2020.

IQBAL, H. *et al.* From Lab to Field: Harnessing H₂O₂-Mediated Upregulation of Plant Capacities Under Abiotic Stresses. **Physiologia Plantarum**, v. 177, n. 5, p. e70488, 2025.

IRIN, I. J.; HASANUZZAMAN, M. Organic amendments: enhancing plant tolerance to salinity and metal stress for improved agricultural productivity. **Stresses**, v. 4, n. 1, p. 185-209, 2024.

JAMEEL, J. *et al.* Alleviation of NaCl stress in tomato varieties through promotion of morpho-physiological attributes and biochemical characters. **Scientia Horticulturae**, v. 325, p. 112496, 2024.

JAMSHIDI GOHARRIZI, K.; KARAMI, S.; GHANAEI, S. Hydrogen peroxide priming promotes salinity tolerance in plants—A comprehensive review. **Agronomy Journal**, v. 116, n. 2, p. 612-629, 2024.

JAWAID, M. Z. *et al.* Seed Priming Mitigates the Salt Stress in Eggplant (*Solanum melongena*) by Activating Antioxidative Defense Mechanisms. **Phyton (0031-9457)**, v. 94, n. 8, 2025.

JIRA-ANUNKUL, W.; PATTANAGUL, W. Seed priming with hydrogen peroxide alleviates the effects of drought stress in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings. **Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca**, v. 48, n. 1, p. 273-283, 2020.

KAYA, C. *et al.* Integrative roles of nitric oxide and hydrogen sulfide in melatonin-induced tolerance of pepper (*Capsicum annuum* L.) plants to iron deficiency and salt stress alone or in combination. **Physiologia plantarum**, v. 168, n. 2, p. 256-277, 2020.

KERCHEV, P. *et al.* Molecular priming as an approach to induce tolerance against abiotic and oxidative stresses in crop plants. **Biotechnology advances**, v. 40, p. 107503, 2020.

- KHAN, H. A. *et al.* Salt sensitivity in chickpea: Growth, photosynthesis, seed yield components and tissue ion regulation in contrasting genotypes. **Journal of plant physiology**, v. 182, p. 1-12, 2015.
- KIM, J. *et al.* Functional characterization of phytochrome interacting factor 3 in phytochrome-mediated light signal transduction. **The Plant Cell**, v. 15, n. 10, p. 2399-2407, 2003.
- KIM, J. *et al.* High accumulation of anthocyanins via the ectopic expression of AtDFR confers significant salt stress tolerance in *Brassica napus* L. **Plant Cell Reports**, v. 36, n. 8, p. 1215-1224, 2017.
- LI, C *et al.* ECAP is a key negative regulator mediating different pathways to modulate salt stress-induced anthocyanin biosynthesis in Arabidopsis. **New Phytologist**, v. 233, n. 5, p. 2216-2231, 2022.
- LICHTENTHALER, H. K. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. *In: Methods in Enzymology*. Academic Press, 1987. v. 148, p. 350-382.
- LIU, H. *et al.* Versatile MXene-zymes eliminate ROS to promote seed germination under salt stress. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 72, n. 44, p. 24311-24324, 2024.
- LIU, H.; ABLE, A. J.; ABLE, J. A. Priming crops for the future: rewiring stress memory. **Trends in plant science**, v. 27, n. 7, p. 699-716, 2022.
- MAGUIRE, J. D. Speed of germination—aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigor. **Crop Science**, v. 2, n. 2, p. 176-177, 1962.
- MASUD, A. A. C. *et al.* Comparative efficacy of PEG and H₂O₂ priming in mitigating salt stress during germination and early seedling establishment of cowpea (*Vigna unguiculata*). **Discover Plants**, v. 3, n. 1, p. 27, 2026.
- MENGUTAY, M. *et al.* Adequate magnesium nutrition mitigates adverse effects of heat stress on maize and wheat. **Plant Soil**, v. 368, p. 57–72, 2013.
- MIAO, Y. *et al.* Moderate drought followed by re-watering initiates beneficial changes in the photosynthesis, biomass production and Rubiaceae-type cyclopeptides (RAs) accumulation of *Rubia yunnanensis*. **Industrial Crops and Products**, v. 148, p. 112284, 2020.
- MISHRA, N. *et al.* Achieving abiotic stress tolerance in plants through antioxidative defense mechanisms. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, p. 1110622, 2023.
- MOHAMED, I. A. A *et al.* RNA-seq analysis revealed key genes associated with salt tolerance in rapeseed germination through carbohydrate metabolism, hormone, and MAPK signaling pathways. **Industrial Crops and products**, v. 176, p. 114262, 2022.
- NAKANO, Y.; ASADA, K. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts. **Plant and Cell Physiology**, v. 22, n. 5, p. 867-880, 1981.

- NGUYEN, N. H. HY5, an integrator of light and temperature signals in the regulation of anthocyanins biosynthesis in Arabidopsis. **AIMS Molecular Science**, v. 7, n. 2, p. 129-142, 2020.
- NOUNJAN, N.; THEERAKULPISUT, P. Physiological evaluation for salt tolerance in green and purple leaf color rice cultivars at seedling stage. **Physiology and Molecular Biology of Plants**, v. 27, n. 12, p. 2819-2832, 2021.
- PARIHAR, P et al. Effect of salinity stress on plants and its tolerance strategies: a review. **Environmental science and pollution research**, v. 22, n. 6, p. 4056-4075, 2015.
- PESSOA, L. N. *et al.* Exogenous hydrogen peroxide attenuates salinity damage in cowpea. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 29, n. 12, p. e293064, 2025.
- RADY, M. M. *et al.* Role of Seed Priming Using Natural Biostimulants in Reducing Salt Stress Effects by Reshaping Physio-biochemical and antioxidant defense systems in Glycine max seedlings. **Frontiers in Plant Science**, v. 16, p. 1630537, 2025.
- ROSA, S. B. *et al.* Cytosolic APX knockdown indicates an ambiguous redox responses in rice. **Phytochemistry**, v. 71, n. 5-6, p. 548-558, 2010.
- SAISI, C. *et al.* Hydrogen peroxide priming alleviates NaCl stress in tomato varieties by promoting morpho-physiological attributes and biochemical characters. **Plant Stress**, v. 11, p. 100295, 2024.
- SAJEEV, N.; KOORNNEEF, M.; BENTSINK, L. A commitment for life: Decades of unraveling the molecular mechanisms behind seed dormancy and germination. **The Plant Cell**, v. 36, n. 5, p. 1358–1376, 2024.
- SANTANA, Denise Garcia; RANAL, Marli. **Análise da germinação: um enfoque estatístico**. UnB, 2004.
- SANTOS GUARALDO, M. M. *et al.* Priming with sodium nitroprusside and hydrogen peroxide increases cotton seed tolerance to salinity and water deficit during seed germination and seedling development. **Environmental and Experimental Botany**, v. 209, p. 105294, 2023.
- SARKAR, A. *et al.* A halotolerant Enterobacter sp. displaying ACC deaminase activity promotes rice seedling growth under salt stress. **Research in Microbiology**, v. 169, n. 1, p. 20-32, 2018.
- SHALABY, O. A. E.; FARAG, R.; IBRAHIM, M. F. M. Effect of hydrogen sulfide and hydrogen peroxide on growth, yield and nutrient content of broccoli plants grown under saline conditions. **Scientia Horticulturae**, v. 316, p. 112035, 2023.
- SHELAR, Amruta et al. Sustainable agriculture through multidisciplinary seed nanopriming: prospects of opportunities and challenges. **Cells**, v. 10, n. 9, p. 2428, 2021.
- SIDDIQUI, M. H. *et al.* Melatonin and gibberellic acid promote growth and chlorophyll biosynthesis by regulating antioxidant and methylglyoxal detoxification system in tomato seedlings under salinity. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 39, n. 4, p. 1488-1502, 2020.

SILVA, H. *et al.* Use of hydrogen peroxide in acclimation of basil (*Ocimum basilicum* L.) to salt stress. **Turkish Journal of Botany**, v. 43, n. 2, p. 208-217, 2019.

SMIRNOFF, N.; ARNAUD, D. Hydrogen peroxide metabolism and functions in plants. **New Phytologist**, v. 221, n. 3, p. 1197-1214, 2019.

TANIA, S. S. *et al.* Alleviation of salt-inhibited germination and seedling growth of kidney bean by seed priming and exogenous application of salicylic acid (SA) and hydrogen peroxide (H_2O_2). **Seeds**, v. 1, n. 2, p. 87-98, 2022.

ULLAH, A. *et al.* Exogenous γ -aminobutyric acid (GABA) mitigated salinity-induced impairments in mungbean plants by regulating their nitrogen metabolism and antioxidant potential. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 1081188, 2023.

USMAN, M. *et al.* Integrating biochemical pathways, transcriptional regulation, proteomics, and genetic approaches for enhancing salt stress tolerance in crops. **Tropical Plants**, v. 4, n. 1, 2025.

VELIKOVA, V.; YORDANOV, I.; EDREVA, A. Oxidative stress and some antioxidant systems in acid rain-treated bean plants: protective role of exogenous polyamines. **Plant Science**, v. 151, n. 1, p. 59-66, 2000.

VILLAGOMEZ-ARANDA, A. L. *et al.* H_2O_2 priming: Biostimulation, drought tolerance and DNA methylation profile with intergenerational impact in tobacco plant. **Environmental and Experimental Botany**, v. 226, p. 105859, 2024.

VOLKOVA, P. Y.; BONDARENKO, E. V.; KAZAKOVA, E. A. Radiation hormesis in plants. **Current Opinion in Toxicology**, v. 30, p. 100334, 2022.

WELLBURN, A. R. The spectral determination of chlorophylls a and b, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution. **Journal of Plant Physiology**, v. 144, n. 3, p. 307-313, 1994.

WICIARZ, M. *et al.* Enhanced chloroplastic generation of H_2O_2 in stress-resistant *Theilungiella salsuginea* in comparison to *Arabidopsis thaliana*. **Physiologia Plantarum**, v. 153, n. 3, p. 467-476, 2015.

YAO, L. *et al.* Unlocking the Synergy: ABA Seed Priming Enhances Drought Tolerance in Seedlings of Sweet Sorghum Through ABA-IAA Crosstalk. **Plant, Cell & Environment**, 2025.