



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FITOTECNIA
MESTRADO EM FITOTECNIA

ISAQUE DE OLIVEIRA LEITE

METIONINA E GABA NA ATENUAÇÃO DO ESTRESSE SALINO EM RÚCULA

MOSSORÓ-RN
2026

ISAQUE DE OLIVEIRA LEITE

METIONINA E GABA NA ATENUAÇÃO DO ESTRESSE SALINO EM RÚCULA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Mestre em Fitotecnia. Linha de Pesquisa: Práticas Culturais e culturas na área Agricultura tropical.

Orientador: Prof. Dr. Aurélio Paz Barros Júnior
Coorientador: Prof. Dr. João Everthon da Silva Ribeiro

MOSSORÓ-RN
2026

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

L76m Leite, Isaque de Oliveira.
 Metionina e GABA na atenuação do estresse
 salino em rúcula / Isaque de Oliveira Leite. -
 2026.
 67 f. : il.

 Orientador: Aurélio Paz Barros .
 Coorientador: João Everthon da Silva Ribeiro.
 Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal
 Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em
 Fitotecnia, 2026.

 1. Eruca sativa. 2. aminoácidos. 3. estresse
 abiótico. 4. desempenho fotossintético. 5.
 prolina. I. Barros , Aurélio Paz , orient. II.
 Ribeiro, João Everthon da Silva , co-orient. III.
 Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo) autor(a).

Biblioteca Campus Mossoró / Setor de Informação e Referência

Bibliotecária: Keina Cristina Santos Sousa e Silva

CRB: 15/120

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

ISAQUE DE OLIVEIRA LEITE

METIONINA E GABA NA ATENUAÇÃO DO ESTRESSE SALINO EM RÚCULA

Defendida em: 13/02/2026

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Aurélio Paes Barros Júnior
(Orientador)

Dr. João Everthon da Silva Ribeiro
(Coorientador)

Prof. Dr. Fred Augusto Lourêdo de Brito
(Membro interno)

Prof. Dr. Toshik Iarley da Silva
(Membro externo)

Prof. Dr. Thiago Jardelino Dias
(Membro externo)

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me concedido saúde, força, sabedoria e perseverança ao longo de toda esta jornada, guiando-me nos momentos de dificuldade e iluminando minhas decisões.

À minha família, base fundamental da minha formação humana e acadêmica, pelo amor incondicional, apoio constante, incentivo e compreensão, mesmo nos momentos de ausência e renúncia, em especial à minha esposa, Itacilha Mozana do Nascimento, pelo companheirismo, paciência, incentivo diário e apoio incondicional ao longo de toda esta caminhada.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Aurélio Paz Barros Júnior, pela confiança, orientação, dedicação e contribuições científicas ao longo do desenvolvimento deste trabalho, fundamentais para minha formação acadêmica e profissional.

Ao meu coorientador, Dr. João Everthon da Silva Ribeiro, pelos valiosos ensinamentos, contribuições, disponibilidade, incentivo e apoio científico durante a condução da pesquisa.

Aos membros da banca examinadora, pela disponibilidade, pelas contribuições técnicas e pelas valiosas sugestões que certamente enriqueceram este trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos, fundamental para a realização desta pesquisa.

Ao Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), aos professores e servidores, pelo suporte acadêmico, estrutura e ensinamentos compartilhados ao longo do curso.

Aos colegas de laboratório do Grupo de Estudos e Pesquisa em Produção Agrícola e Recursos Genéticos Vegetais (GRPPARG) e de pós-graduação, pela convivência, trocas de conhecimento, apoio e amizade durante essa etapa.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho, meu sincero agradecimento.

DEDICATÓRIA

A Deus e à minha família
Dedico

EPÍGRAFE

Eu não sou quem eu gostaria de ser.
Eu não sou quem eu poderia ser, ainda.
Eu não sou quem eu deveria ser.
Mas, graças a Deus, eu não sou mais quem eu era!

- *Martin Luther King*

METIONINA E GABA NA ATENUAÇÃO DO ESTRESSE SALINO EM RÚCULA

RESUMO

A salinidade da água de irrigação limita o desempenho fisiológico e o crescimento da rúcula (*Eruca sativa* Mill.), exigindo estratégias mitigadoras eficientes. Nesse contexto, o uso de bioestimulantes surge como estratégia promissora para mitigar os efeitos deletérios da salinidade. O objetivo deste estudo foi avaliar os efeitos da aplicação de metionina (Met) e ácido gama-aminobutírico (GABA), na atenuação do estresse salino. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, em delineamento em blocos casualizados, em esquema fatorial 3×4 , com três níveis de condutividade elétrica da água (0,5; 2,5 e 4,5 dS m⁻¹) e quatro tratamentos de aplicação exógena (sem bioestimulante; metionina à 0,3 mM; GABA a 0,5 mM; e metionina + GABA). Variáveis de trocas gasosas, fluorescência da clorofila, pigmentos fotossintéticos, crescimento, atributos e aspectos bioquímicos foram avaliadas. O aumento da salinidade reduziu a taxa de assimilação de CO₂ (A) em até 49,5% e a condutância estomática em 53,7% no tratamento sem bioestimulantes sob estresse severo (4,5 dS m⁻¹), a aplicação de GABA e metionina aumentou a A em 25,8% e 22,2%, respectivamente, ao passo que a aplicação combinada promoveu incremento de 44,9%, além de elevar a eficiência intrínseca do uso da água em 23,0% e a eficiência de carboxilação em 24,7%. A aplicação conjunta de metionina + GABA aumentou os teores de clorofila total e carotenoides em 13,6 e 16,3%, respectivamente, além de incrementar a fluorescência máxima em 13,8%. A salinidade reduziu a massa seca total em 42,7%, porém a aplicação combinada de metionina + GABA atenuou esse efeito, promovendo aumentos de 27,1% na massa seca da parte aérea, 54,1% na massa seca da raiz e 33,8% na massa seca total, além de reduzir o extravasamento de eletrólitos em até 47,1%. A aplicação exógena de metionina e GABA, especialmente de forma combinada, é uma estratégia eficiente para aumentar a tolerância da rúcula ao estresse salino, preservando a atividade fotossintética, a integridade das membranas e o crescimento vegetal.

Palavras-chave: *Eruca sativa*; aminoácidos; estresse abiótico; desempenho fotossintético; prolina.

METHIONINE AND GABA IN THE ATTENUATION OF SALT STRESS IN ARUGULA

ABSTRACT

Salinity of irrigation water limits the physiological performance and growth of arugula (*Eruca sativa* Mill.), requiring effective mitigation strategies. In this context, the use of biostimulants emerges as a promising approach to alleviate the deleterious effects of salinity. The objective of this study was to evaluate the effects of methionine (Met) and gamma-aminobutyric acid (GABA) application on the attenuation of salt stress. The experiment was conducted in a greenhouse under a randomized block design in a 3×4 factorial scheme, consisting of three levels of irrigation water electrical conductivity (0.5, 2.5, and 4.5 dS m⁻¹) and four exogenous application treatments (no biostimulant; methionine at 0.3 mM; GABA at 0.5 mM; and methionine + GABA). Gas exchange parameters, chlorophyll fluorescence, photosynthetic pigments, growth traits, and biochemical attributes were evaluated. Increasing salinity reduced the CO₂ assimilation rate (A) by up to 49.5% and stomatal conductance by 53.7% in the treatment without biostimulants. Under severe stress (4.5 dS m⁻¹), GABA and methionine application increased A by 25.8% and 22.2%, respectively, while the combined application promoted a 44.9% increase, in addition to enhancing intrinsic water use efficiency by 23.0% and carboxylation efficiency by 24.7%. The combined application of methionine + GABA increased total chlorophyll and carotenoid contents by 13.6% and 16.3%, respectively, and enhanced maximum fluorescence by 13.8%. Salinity reduced total dry mass by 42.7%; however, the combined application of methionine + GABA mitigated this effect, promoting increases of 27.1% in shoot dry mass, 54.1% in root dry mass, and 33.8% in total dry mass, in addition to reducing electrolyte leakage by up to 47.1%. The exogenous application of methionine and GABA, especially in combination, is an efficient strategy to enhance arugula tolerance to salt stress by preserving photosynthetic activity, membrane integrity, and plant growth.

Keywords: *Eruca sativa*; Salinity; amino acids; abiotic stress; photosynthetic performance; membrane integrity.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** – Temperatura do ar máxima e mínima (°C) e da umidade relativa do ar máxima e mínima (%) registrada durante o período de condução do experimento.....18
- Figura 2** - Taxa de assimilação líquida de CO₂ - A (A), condutância estomática - gs (B), transpiração - E (C), concentração interna de CO₂ - Ci (D) Eficiência instantânea do uso da água – EUA (E), eficiência intrínseca do uso da água – EiUA (F) e eficiência de carboxilação – EiC (G) em plantas de rúcula de folha larga sob níveis de condutividade elétrica da água de irrigação (CEa: 0,5, 2,5 e 4,5 dS m⁻¹) e concentrações de metionina (0,3 mM), GABA (0,5 mM) e a combinação Met + GABA (0,3 + 0,5 mM).....25
- Figura 3** - Fluorescência máxima - Fm (A) e fluorescência variável - Fv (B) em plantas de rúcula de folha larga sob níveis de condutividade elétrica da água de irrigação (CEa: 0,5, 2,5 e 4,5 dS m⁻¹) e concentrações de metionina (0,3 mM), GABA (0,5 mM) e combinação Met + GABA (0,3 + 0,5 mM).....29
- Figura 4** - Clorofila a (A), clorofila b (B), clorofila total (C) e carotenoides (D) em plantas de rúcula de folha larga sob níveis de condutividade elétrica da água de irrigação (CEa: 0,5, 2,5 e 4,5 dS m⁻¹) e concentrações de metionina (0,3 mM), GABA (0,5 mM) e a combinação Met + GABA (0,3 + 0,5 mM).....32
- Figura 5** - Altura de planta (A), diâmetro do caule (B), número de folhas (C), diâmetro da parte aérea (D) e comprimento de raiz (E) em plantas de rúcula de folha larga sob níveis de condutividade elétrica da água de irrigação (CEa: 0,5, 2,5 e 4,5 dS m⁻¹) e concentrações de metionina (0,3 mM), GABA (0,5 mM) e a combinação Met + GABA (0,3 + 0,5 mM).....34
- Figura 6** - Conteúdo relativo de água – CRA (A), massa foliar por área – MFA (B), suculência (C) e extravasamento de elétrons – EE (D) em plantas de rúcula de folha larga sob níveis de condutividade elétrica da água de irrigação (CEa: 0,5, 2,5 e 4,5 dS m⁻¹) e concentrações de metionina (0,3 mM), GABA (0,5 mM) e a combinação Met + GABA (0,3 + 0,5 mM).....37
- Figura 7** - Massa seca da parte aérea – MASP (A), massa seca da raiz – MSR (B) e massa seca total – MST (C) em plantas de rúcula de folha larga sob níveis de condutividade elétrica da água de irrigação (CEa: 0,5, 2,5 e 4,5 dS m⁻¹) e concentrações de metionina (0,3 mM), GABA (0,5 mM) e a combinação Met + GABA (0,3 + 0,5 mM).....40
- Figura 8** - Plantas de rúcula sob níveis de condutividade elétrica da água de irrigação (0,5; 2,5 e 4,5 dS m⁻¹) e concentrações de metionina (0,3 mM), GABA (0,5 mM) e a combinação Met + GABA (0,3 + 0,5 mM).....43
- Figura 9** - Açúcares redutores totais – ART (A), açúcares solúveis totais – AST (B), proteínas (C) e Prolina (D) em plantas de rúcula de folha larga sob níveis de condutividade elétrica da água de irrigação (CEa: 0,5, 2,5 e 4,5 dS m⁻¹) e concentrações de metionina (0,3 mM), GABA (0,5 mM) e a combinação Met + GABA (0,3 + 0,5 mM).....45

Figura 10 - Teor de sódio (A) e teor de potássio (B) em plantas de rúcula de folha larga sob níveis de condutividade elétrica da água de irrigação (CEa: 0,5, 2,5 e 4,5 dS m⁻¹) e concentrações de metionina (0,3 mM), GABA (0,5 mM) e a combinação Met + GABA (0,3 + 0,5 mM).....48

Figura 11 - Análise de Componentes Principais (ACP) entre os tratamentos e as variáveis avaliadas.....50

Figura 12 - Análise da correlação de Pearson entre as variáveis avaliadas.....53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Atributos químicos e físicos do solo utilizado no experimento.....	19
--	----

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	14
3 MATERIAL E MÉTODOS	18
3.1 LOCAL DO EXPERIMENTO E CONDIÇÕES CLIMÁTICAS	18
3.2 MATERIAL VEGETAL E CLASSIFICAÇÃO DO SOLO	18
3.3 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL	19
3.4 VARIÁVEIS ANALISADAS	20
3.4.1 Trocas gasosas	20
3.4.2 Fluorescência da clorofila a	20
3.4.3 Pigmentos fotossintéticos.....	21
3.4.4 Atributos morfofuncionais e teor relativo de água	21
3.4.5 Extravasamento de eletrólitos.....	22
3.4.6 Crescimento e biomassa	22
3.4.7 Variáveis bioquímicas.....	22
3.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA	23
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	24
5 CONCLUSÕES	56
REFERÊNCIAS	57

1 INTRODUÇÃO

A salinidade dos solos e da água de irrigação é um dos principais fatores limitantes à produção agrícola em escala global, afetando negativamente a produtividade e a sustentabilidade dos sistemas de cultivo, especialmente em regiões áridas e semiáridas (Castro; Santos, 2020). Estima-se que mais de 20% das áreas irrigadas no mundo apresentem algum grau de salinização, fenômeno intensificado pelo uso inadequado da irrigação, pela baixa qualidade da água e pelas mudanças climáticas (Yu *et al.*, 2025).

O estresse salino afeta as plantas por meio de três mecanismos principais: o estresse osmótico, decorrente da redução do potencial hídrico do solo, a toxicidade iônica, associada ao acúmulo excessivo de íons como sódio (Na^+) e cloreto (Cl^-), e o estresse oxidativo, caracterizado pela produção excessiva de espécies reativas de oxigênio (EROs) (Balasubramaniam *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2026). Esses efeitos comprometem processos fisiológicos essenciais, como a absorção de água e nutrientes, a integridade das membranas celulares, a fotossíntese e o metabolismo energético, resultando em redução do crescimento e da produtividade das culturas (Taiz *et al.*, 2024).

Dentre as hortaliças folhosas, a rúcula (*Eruca sativa* Mill.) destaca-se pelo elevado valor nutricional, sabor característico e crescente demanda no mercado consumidor. A cultura apresenta alto teor de compostos bioativos, como glucosinolatos, vitaminas e minerais, sendo amplamente utilizada na alimentação humana (Amani *et al.*, 2025). No entanto, a rúcula é considerada moderadamente sensível à salinidade, apresentando redução significativa do crescimento, da área foliar e da produção de biomassa quando submetida a condições salinas, especialmente em sistemas irrigados (Gruda; Dong; Li, 2024; Torres *et al.*, 2024).

Diante desse cenário, estratégias visando a mitigar os efeitos deletérios do estresse salino nas plantas tornam-se fundamentais para a manutenção da produtividade agrícola. A aplicação de compostos com ação bioestimulante de plantas ao estresse abiótico tem se mostrado uma alternativa promissora (Bulgari; Franzoni; Ferrante, 2019). Dentre esses compostos, destaca-se a metionina, aminoácido essencial que desempenha papel central no metabolismo vegetal, sendo precursora da síntese de etileno, poliaminas e glutatona, moléculas relacionadas às respostas ao estresse abiótico (Hasanuzzaman *et al.*, 2019). A metionina tem sido associada ao aumento da

capacidade antioxidante, à proteção das membranas celulares e à melhoria do crescimento vegetal sob condições adversas, incluindo salinidade (Almas *et al.*, 2021; García-Valencia *et al.*, 2025).

Outro composto de relevância fisiológica é o ácido γ -aminobutírico (GABA), um aminoácido não proteico amplamente distribuído nos tecidos vegetais, que atua como regulador metabólico e sinalizador em respostas ao estresse (Yousaf *et al.*, 2025). O GABA está envolvido na regulação osmótica, na manutenção da homeostase iônica, na ativação do sistema antioxidante e na proteção do aparato fotossintético sob condições de estresse salino (Kalhor *et al.*, 2018; Johnson *et al.*, 2025). Apesar dos avanços no entendimento dos efeitos isolados desses compostos, ainda são escassos os estudos avaliando o uso combinado de metionina e GABA para atenuar o estresse salino em culturas hortícolas, como a rúcula. Desta forma, a hipótese do presente estudo é que a aplicação exógena de metionina e GABA, individual e em combinada, atenua os efeitos deletérios do estresse salino na rúcula por meio da melhoria da homeostase iônica, ativação do sistema antioxidante, regulação osmótica e modulação dos processos fotossintéticos, resultando na manutenção do crescimento e da produtividade da cultura em condições salinas.

Diante disso, o objetivo deste trabalho é avaliar os efeitos da aplicação exógena de metionina e GABA, isoladamente e em combinação, sobre o crescimento, as trocas gasosas, os pigmentos fotossintéticos, a fluorescência da clorofila e aspectos bioquímicos associados à tolerância ao estresse salino em plantas de rúcula (*Eruca sativa* Mill.).

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A CULTURA DA RÚCULA

A rúcula (*Eruca sativa* Mill.) é uma hortaliça folhosa pertencente à família Brassicaceae, amplamente cultivada e consumida no Brasil e em diversas regiões do mundo, destacando-se pelo ciclo curto, elevado valor nutricional e importância econômica para a agricultura familiar. A rúcula possui elevada demanda hídrica e rápida resposta às condições ambientais, o que a torna sensível a estresses abióticos, incluindo a salinidade (Costa *et al.*, 2024; Ciriello *et al.*, 2025). Em condições salinas, a rúcula apresenta alterações fisiológicas e bioquímicas, como redução do crescimento, diminuição da área foliar, alterações na absorção de nutrientes e comprometimento da atividade fotossintética, refletindo-se diretamente na produtividade e qualidade comercial das folhas (Torres *et al.*, 2024).

Ensaios experimentais com rúcula sob estresse salino demonstram aumento da produção de espécies reativas de oxigênio, alterações dos pigmentos fotossintéticos e redução da eficiência fotossintética e do crescimento vegetativo da planta (Corti *et al.*, 2025; Stein; Minuzzi, 2025).

2.2 ESTRESSE SALINO, OSMÓTICO, IÔNICO E OXIDATIVO EM PLANTAS

O estresse salino é um dos principais fatores abióticos que limitam o crescimento e a produtividade das culturas agrícolas, especialmente em regiões áridas e semiáridas. Esse estresse ocorre em virtude do acúmulo excessivo de sais solúveis no solo ou na água de irrigação, predominantemente NaCl, o que compromete a disponibilidade hídrica e nutricional para as plantas (Singh *et al.*, 2024; Norouzi; Akbari, 2025). A salinização pode ter origem natural, associada à intemperização de rochas e à evaporação elevada, ou ser intensificada por práticas agrícolas inadequadas, como o uso contínuo de água salina na irrigação, drenagem deficiente e manejo incorreto do solo (Chele *et al.*, 2021; Singh, 2021).

A resposta das plantas à salinidade ocorre em três fases principais, envolvendo inicialmente o estresse osmótico, seguido pelo estresse iônico e, posteriormente, pelo estresse oxidativo. No primeiro momento, o aumento da concentração salina no solo reduz o potencial osmótico da solução do solo, o que dificulta a absorção de água pelas raízes, mesmo quando a umidade é adequada (Shams; Khadivi, 2023).

Com a continuidade da exposição ao sal, ocorre o estresse iônico, caracterizado pelo acúmulo excessivo de Na^+ e Cl^- nos tecidos vegetais, levando a desequilíbrios nutricionais, inibição enzimática e distúrbios metabólicos (Ma *et al.*, 2022). Esses processos culminam no estresse oxidativo, decorrente da produção exacerbada de espécies reativas de oxigênio (EROs), que provocam peroxidação lipídica, degradação de proteínas e danos ao DNA celular (Hasanuzzaman *et al.*, 2020).

2.3 MECANISMOS DE TOLERÂNCIA AO ESTRESSE SALINO, SISTEMA ANTIOXIDANTE, AJUSTE OSMÓTICO E REGULAÇÃO FOTOSSINTÉTICA

Manter o equilíbrio dos sais dentro das células é fundamental para que as plantas tolerem a salinidade. As espécies mais tolerantes conseguem reduzir a entrada excessiva de sódio (Na^+) e preservar níveis adequados de potássio (K^+), o que garante o funcionamento normal das células. Para isso, proteínas presentes na membrana celular, como o sistema SOS e os antiportes Na^+/H^+ (NHX), ajudam a controlar o transporte e o acúmulo desses íons, contribuindo para a estabilidade metabólica das plantas (Isayenkov; Maathuis, 2019).

A eficiência do sistema antioxidante está diretamente associada à capacidade de tolerância das plantas à salinidade, sendo frequentemente utilizada como indicador fisiológico em estudos de estresse abiótico (Fathi *et al.*, 2025).

O ajuste osmótico é outro mecanismo essencial de adaptação ao estresse salino e ocorre por meio do acúmulo de solutos compatíveis, como prolina, glicina betaína, açúcares solúveis e aminoácido (Puniran-Hartley, 2024). Esses compostos contribuem para a manutenção do potencial hídrico celular, proteção de estruturas subcelulares e estabilização de proteínas e membranas, sem interferir negativamente no metabolismo (Atta *et al.*, 2023).

Plantas sob estresse salino também ajustam sua atividade fotossintética por meio da dissipação de energia luminosa excedente e do aumento da eficiência fotoquímica, reduzindo danos foto-oxidativos aos fotossistemas (Suárez-Salazar *et al.*, 2024). Esses ajustes fisiológicos incluem alterações na fluorescência da clorofila, na eficiência do fotossistema II e na taxa de transporte de elétrons, mecanismos essenciais à sobrevivência sob condições adversas (Guidi; Lo Piccolo; Landi, 2019).

2.4 USO DE BIOESTIMULANTES NO ESTRESSE SALINO EM PLANTAS

Diante dos efeitos deletérios da salinidade sobre o crescimento, a fisiologia e a produtividade das plantas, diversas estratégias têm sido estudadas com o objetivo de mitigar os impactos do estresse salino. Dentre essas estratégias, destaca-se o uso de bioestimulantes fisiológicos, definidos como substâncias aplicadas exogenamente capazes de modular respostas metabólicas, bioquímicas e fisiológicas das plantas, aumentando sua tolerância a condições adversas (Garg *et al.*, 2023).

Esses bioestimulantes incluem aminoácidos, reguladores de crescimento, osmoprotetores, antioxidantes e moléculas sinalizadoras, que atuam na manutenção da homeostase iônica, no fortalecimento do sistema antioxidante, no ajuste osmótico e na preservação da atividade fotossintética sob estresse salino (Rouphael; Colla, 2020).

A aplicação exógena desses compostos tem demonstrado potencial para reduzir o acúmulo de íons tóxicos, minimizar danos oxidativos e melhorar o desempenho fisiológico das plantas. Ativação do sistema antioxidante, evidenciando a necessidade de estratégias que minimizem os efeitos negativos da salinidade sobre o desempenho fisiológico da cultura (Kusvuran; Ellialtioglu, 2021).

2.5 METIONINA EM PLANTAS E ÁCIDO γ -AMINOBUTÍRICO (GABA)

A metionina é um aminoácido essencial que desempenha papel central no metabolismo vegetal, atuando como precursora de compostos biologicamente ativos, como etileno, poliaminas e glutatona. Esses metabólitos estão diretamente envolvidos na regulação do crescimento, no controle do estresse oxidativo e na resposta a estresses abióticos (Almas *et al.*, 2021).

Em condições de estresse salino, a metionina está associada à proteção celular, principalmente por sua participação indireta na síntese de antioxidantes e na manutenção do equilíbrio redox. A aplicação exógena de metionina tem sido relacionada à redução dos danos oxidativos, aumento da atividade antioxidante e melhoria da eficiência fotossintética em diferentes espécies vegetais (Ahmad *et al.*, 2025; Li; Zhang, 2025).

O ácido γ -aminobutírico (GABA) é um aminoácido não proteico amplamente distribuído em plantas, atuando como metabólito intermediário do ciclo do GABA, que conecta o metabolismo

do carbono e do nitrogênio. Além de sua função metabólica, o GABA desempenha papel importante na regulação do pH celular, no balanço redox e na sinalização celular (Li *et al.*, 2021). Sob condições de estresse abiótico, incluindo salinidade, a concentração endógena de GABA aumenta significativamente, sendo associada à tolerância das plantas a ambientes adversos. A aplicação exógena de GABA tem sido relatada como estratégia eficiente para atenuar os efeitos do estresse salino, promovendo melhorias no crescimento, na fotossíntese e na atividade antioxidante (Wu *et al.*, 2020).

O GABA contribui para a redução do acúmulo de Na^+ , manutenção da homeostase iônica, aumento da atividade de enzimas antioxidantes como SOD, CAT e APX, além de favorecer o ajuste osmótico por meio do acúmulo de solutos compatíveis (Jin *et al.*, 2023).

Estudos recentes indicam que a combinação de compostos como GABA e aminoácidos sulfurados, incluindo a metionina, pode resultar em efeitos sinérgicos, como maior ativação do sistema antioxidante, melhor ajuste osmótico, manutenção da homeostase iônica e preservação da atividade fotossintética sob salinidade (Desoky *et al.*, 2019; Ahmad; Blasco; Martos, 2022).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 LOCAL DO EXPERIMENTO E CONDIÇÕES CLIMÁTICAS

O experimento foi conduzido em casa de vegetação localizada na Horta Didática do Departamento de Ciências Agronômicas e Florestais, pertencente à Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) ($5^{\circ}12'28''$ S, $37^{\circ}19'04''$ W; altitude de 24 m), em Mossoró, Rio Grande do Norte, Brasil, no período de sete de agosto a 19 de setembro de 2025. O clima da região é semiárido quente, classificado como BSh segundo Köppen, caracterizado por uma estação seca prolongada e precipitações concentradas nos meses de verão (Alvares *et al.*, 2013). Durante o período experimental, as condições microclimáticas da casa de vegetação foram monitoradas diariamente por meio de um termohigrômetro digital (Minipa MT-241), sendo registradas a temperatura média do ar e a umidade relativa (Figura 1).

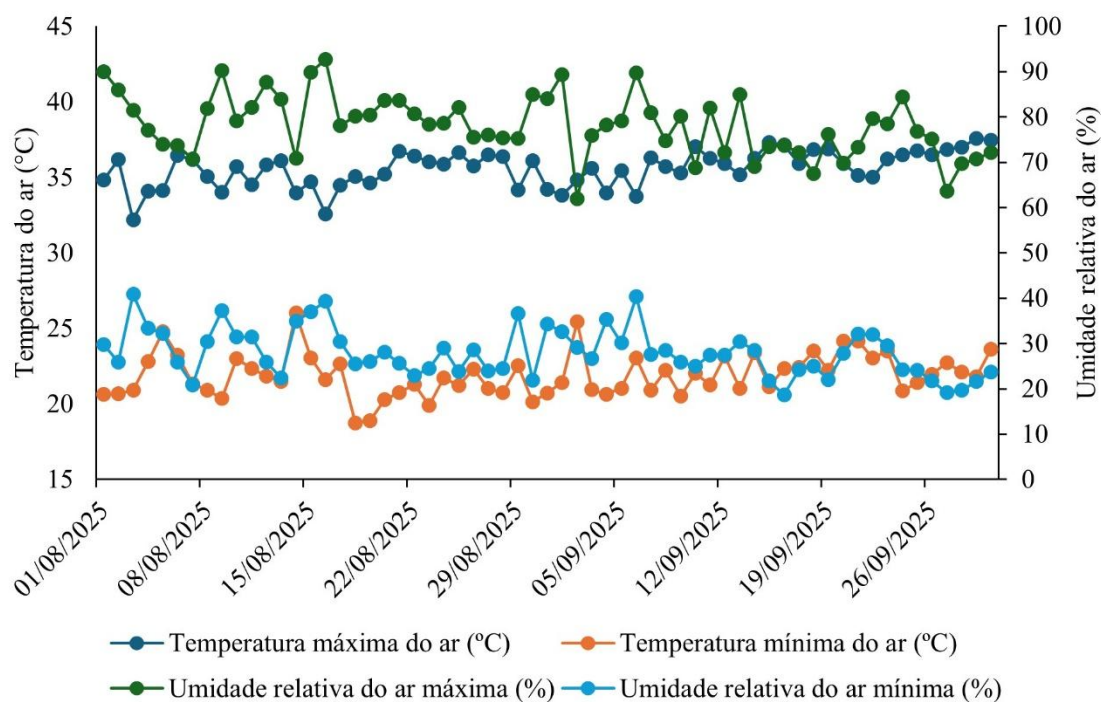


Figura 1 – Temperatura do ar máxima e mínima (°C) e da Umidade relativa do ar máxima e mínima (%) registrada durante o período de condução do experimento. Fonte: O autor (2026).

3.2 MATERIAL VEGETAL E CLASSIFICAÇÃO DO SOLO

Sementes comerciais de rúcula (*Eruca sativa* Mill.) da cultivar Folha Larga foram utilizadas. A cultivar é uma planta herbácea anual, de hábito de crescimento roseta basal, com ciclo vegetativo de 35 a 45 dias após a semeadura (DAS). Foram semeadas cinco sementes em vasos de polietileno (plantio direto), com capacidade de 9 dm³, preenchidos com uma camada de brita para drenagem, completado com solo coletado da camada de 0-20 cm, oriundo da própria Horta Didática. Após dez dias da semeadura, foi realizado o desbaste, mantendo-se uma planta por unidade experimental. O solo utilizado é classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos *et al.*, 2018), cujas características encontram-se descritas na Tabela 1.

Tabela 1 – Atributos químicos e físicos do solo utilizado no experimento.

Profundidade (m)	pH (H ₂ O)	P (mg dm ⁻³)	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	SB (cmol _c dm ⁻³)	t	T	V	m	ESP
0 - 0,20	6,95	4,77	10,6	21	3,82	1,11	0	5,05	5,05	5,05	100	0	1,81
Frações granulométricas (g kg ⁻¹)													
Areia grossa		Areia fina		Areia total		Silte		Argila		Classe textual			
480		330		810		140		50		Areia franca			

Fonte: O autor (2026). O pH em água foi determinado utilizando a relação solo: água de 1:2,5. CE – Condutividade elétrica do extrato solo: água na relação 1:2,5. Os elementos P, Na⁺ e K⁺ foram extraídos com extrator Mehlich-1 na relação solo: extrator de 1:10. Os elementos Ca²⁺, Mg²⁺ e Al³⁺ foram extraídos com KCl 1 mol L⁻¹ na relação solo: extrator de 1:10. (H+Al) – Acidez potencial extraída com acetato de cálcio 0,5 mol L⁻¹ na relação solo: extrator de 1:15. SB – Soma de bases; t – Capacidade de troca catiônica efetiva (CTC); CTC – Capacidade de troca catiônica do solo a pH 7,0; V – Saturação por bases; m – Saturação por alumínio; PST – Percentual de sódio trocável.

3.3 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

O delineamento experimental usado foi em blocos casualizados (DBC), em esquema fatorial 3 × 4, com quatro repetições. Os tratamentos consistiram em três níveis de condutividade elétrica da água de irrigação (CEa), correspondentes a 0,5 dS m⁻¹ (ausência de estresse salino), 2,5 dS m⁻¹ (estresse moderado) e 4,5 dS m⁻¹ (estresse severo) (Silva *et al.*, 2023). Esses níveis foram combinados com quatro tratamentos com bioestimulantes: água destilada (controle, sem bioestimulante), metionina (Met) a 0,3 mM, ácido γ-aminobutírico (GABA) a 0,5 mM e sua combinação Met + GABA. As concentrações dos aminoácidos foram definidas com base nos estudos de Ahmad e Fariduddin (2025) e Shi *et al* (2025).

As águas salinas foram preparadas a partir da diluição do cloreto de sódio, armazenadas em caixas d'água de 250 L, com cada nível salino em uma caixa individual. Os níveis das salinidades

de cada tratamento foram calculados para o volume das caixas d'água e posteriormente verificado por meio de condutivímetro digital portátil. A aplicação dos tratamentos salinos foi iniciada aos 15 dias após a semeadura (DAS), com irrigação diária por meio de sistema de gotejamento, de acordo com o Kc da cultura (De Oliveira Mangarotti *et al.*, 2019). O sistema de irrigação era independente e composto por três motobombas de 0,5 cv.

As soluções de bioestimulantes foram preparadas em água destilada e adjuvante Tween 80 (0,05%). A aplicação dos bioestimulantes teve início no mesmo dia da irrigação com os tratamentos salinos (15 DAS), sendo realizada por pulverização foliar com pulverizador manual a cada quatro dias às 7h00, totalizando cinco aplicações. O volume final aplicado na totalidade foi de 35 mL por planta.

3.4 VARIÁVEIS ANALISADAS

3.4.1 Trocas gasosas

As variáveis de trocas gasosas foram avaliadas aos 42 DAS e determinadas por meio da taxa de assimilação líquida de CO₂ (A, $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), condutância estomática (gs, $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), transpiração (E, $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), concentração interna de CO₂ (Ci, $\mu\text{mol mol}^{-1} \text{ ar}$) e déficit de pressão de vapor (VPD, kPa). A partir desses dados, calcularam-se a eficiência instantânea do uso da água (EUA = A/E), a eficiência intrínseca do uso da água (EiUA = A/g_s) e a eficiência instantânea de carboxilação (EiC = A/Ci). As análises foram realizadas em folhas completamente expandidas e saudáveis, utilizando um analisador portátil de gases por infravermelho (IRGA) (Walz GFS-3000FL), no período entre 8h00 e 10h00. Para a realização das análises, foi utilizado o seguinte protocolo de medição: umidade relativa de 60%; fluxo de ar de 750 $\mu\text{mol s}^{-1}$; concentração de CO₂ de 400 $\mu\text{mol mol}^{-1}$; e luz artificial de 1200 $\mu\text{mol fótons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

3.4.2 Fluorescência da clorofila a

As análises de fluorescência da clorofila foram realizadas aos 42 DAS, no período entre 8h00 e 10h00, utilizando um fluorômetro portátil (PAR-FluorPen FP 110), em folhas completamente expandidas e saudáveis. As medições seguiram o protocolo do equipamento, as folhas foram adaptadas ao escuro, possibilitando a obtenção de parâmetros associados à eficiência

fotoquímica do fotossistema II. Foram determinados os valores de fluorescência inicial (F_o), fluorescência máxima (F_m), fluorescência variável (F_v) e o rendimento quântico do fotossistema II (F_v/F_m), indicadores do estado funcional do aparato fotossintético e da capacidade de dissipação e utilização da energia luminosa pelas plantas.

3.4.3 Pigmentos fotossintéticos

Para a quantificação de clorofila a, clorofila b, clorofila total e carotenoides, a amostragem foliar foi realizada em 42 DAS. Em seguida, dez discos de folhas frescas com área de 6 mm² foram pesadas e colocadas em tubos Eppendorf contendo 10 mL de acetona a 80%. Após 24 horas, a análise da absorbância foi realizada em espectrofotômetro (SP-220, Bioespectro™, Brasil) nos comprimentos de onda de 663,2; 646,8 e 470,0 nm, conforme metodologia proposta por Lichtenthaler (1987).

A concentração dos pigmentos fotossintéticos, carotenoides e feofitinas foi determinada pelas seguintes equações:

$$\text{Clorofila a} = (12,25 \times \text{ABS}_{663,2}) - (2,79 \times \text{ABS}_{646,8})$$

$$\text{Clorofila b} = (21,50 \times \text{ABS}_{646,8}) - (5,10 \times \text{ABS}_{663,2})$$

$$\text{Clorofila total} = \text{Clorofila a} + \text{Clorofila b}$$

$$\text{Carotenoides} = [(1000 \times \text{ABS}_{470}) - (1,82 \times \text{Clorofila a} - 85,02 \times \text{Clorofila b})] / 198$$

3.4.4 Atributos e teor relativo de água

Discos foliares com área de 6 mm² foram coletados no período entre 5h00 e 6h00, aos 43 DAS, acondicionados em recipientes térmicos (cooler) e transportados ao laboratório, a fim de preservar a turgidez celular e minimizar a perda de água. Inicialmente, determinou-se a massa fresca (MF) dos discos em balança analítica. Em seguida, os materiais foram hidratados em 35 mL de água destilada, por 24 horas, para obtenção da massa túrgida (MT), sendo posteriormente pesados (Witkowski; Lamont, 1991). Após esse procedimento, os discos foram secos em estufa de circulação forçada de ar, a 65 °C, por 72 horas, até atingirem massa constante, para determinação da massa seca (MS), então foram novamente pesados (Mantovani, 1999). Com base nos valores de

MF, MT e MS, foram calculados as seguintes variáveis: massa foliar por área (MFA g m^{-2}), suculência foliar (Suc, g m^{-2}) e teor relativo de água (TRA, %), de acordo com a equação:

$\text{TRA} = (\text{MF} - \text{MS}) / (\text{MT} - \text{MS}) \times 100$ conforme proposto por Barrs *et al.* (1962).

3.4.5 Extravasamento de eletrólitos

O extravasamento de eletrólitos (EE) foi determinado conforme metodologia de Bajji *et al.* (2002). Aos 43 DAS, foram coletados dez discos foliares (6 mm^2) por planta, lavados, secos e incubados em 10 mL de água destilada a 25°C durante seis horas. Após esse período, foi medida a condutividade elétrica inicial (CE1). Em seguida, as amostras foram aquecidas a 90°C por 60 minutos, em frascos de vidros fechados, resfriadas e teve-se a condutividade final (CE2). O EE foi expresso em porcentagem, calculado pela razão CE1/CE2.

3.4.6 Crescimento

As variáveis de crescimento foram avaliadas aos 43 DAS, incluindo altura de plantas (cm), diâmetro do caule (mm), número de folhas, diâmetro da parte aérea (cm) e comprimento de raízes (cm), com o auxílio de fita métrica, régua graduada e paquímetro digital. Após a colheita, as plantas foram separadas em parte aérea e raízes, acondicionadas em estufa de circulação forçada de ar a 65°C e mantidas por 96 horas, até atingirem peso constante, para a determinação da massa seca da parte aérea (MASPA), massa seca da raiz (MSR) e massa seca total (MST) expressas em gramas por planta.

3.4.7 Variáveis bioquímicas

O teor de proteínas solúveis foi determinado pelo método de Marion M. Bradford (1976) com leituras de absorbância a 595 nm. Os açúcares solúveis totais foram quantificados pelo método da antrona descrito por Thomas Yemm e Edward C. Willis (1954), com leitura a 620 nm. Os açúcares redutores foram determinados pelo método do ácido 3,5-dinitrossalicílico (DNS), conforme Miller (1959), com leitura a 540 nm. O teor de prolina livre foi estimado segundo o

método proposto por Bates *et al.* (1973) com leitura a 520 nm. Todas as determinações foram realizadas em espectrofotômetro UV-Vis (ESPEC-UV-5100, Technal).

3.4.8 Solutos inorgânicos de sódio (Na^+) e potássio (K^+)

Os teores de sódio (Na^+) e potássio (K^+) foram determinados em amostras de tecido vegetal previamente secas em estufa (65 °C até massa constante) e moídas. Para mineralização, cerca de 0,200 g do material seco foram digeridos por ácido forte em forno de micro-ondas, seguindo procedimento otimizado para tecidos vegetais. A digestão foi realizada com ácido nítrico concentrado (HNO_3) e peróxido de hidrogênio (H_2O_2), com aquecimento controlado até temperatura elevada, garantindo completa oxidação da matéria orgânica. Após resfriamento e ajuste do volume com água deionizada, os extratos foram analisados por espectrofotometria de emissão em chama para quantificação de Na^+ e K^+ , empregando curvas de calibração com padrões certificados e resultados expressos em g kg^{-1} de matéria seca (Obara *et al.*, 2009).

3.5 Análise estatística

Os dados foram submetidos aos testes de normalidade de Shapiro–Wilk e homogeneidade de variâncias de Bartlett. Em seguida, realizou-se análise de variância (ANOVA), com comparação de médias pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Adicionalmente, foram realizadas análises de componentes principais (ACP) e correlação de Pearson para identificação dos padrões de associação entre as variáveis. As análises estatísticas foram conduzidas no *software* R, versão 4.3.2. (R Core Team, 2023).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A taxa de assimilação líquida de CO_2 (A) foi afetada pelo aumento da salinidade da água de irrigação (Figura 2A). Em $0,5 \text{ dS m}^{-1}$, houve diferença significativa entre os tratamentos. O tratamento sem bioestimulante apresentou o maior valor de A ($25,63 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), seguido pelo GABA ($25,05 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) (Figura 2A). A aplicação de metionina ($19,18 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e Met + GABA ($19,17 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) reduziu a assimilação em 25,1 e 25,2%, respectivamente, em relação ao controle (Figura 2A). Em $2,5 \text{ dS m}^{-1}$, o tratamento com GABA apresentou o maior valor ($24,32 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), superando o tratamento sem bioestimulante ($23,65 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) em 2,8%. A aplicação de metionina ($18,68 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e Met + GABA ($15,64 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) reduziu a assimilação em 21,0 e 33,9%, respectivamente. Sob $4,5 \text{ dS m}^{-1}$, o tratamento sem bioestimulante apresentou o menor valor ($12,95 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) (Figura 2A). A aplicação de metionina ($15,83 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), GABA ($16,28 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e Met + GABA ($18,76 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) aumentou a assimilação em 22,2, 25,7 e 44,9%, respectivamente (Figura 2A).

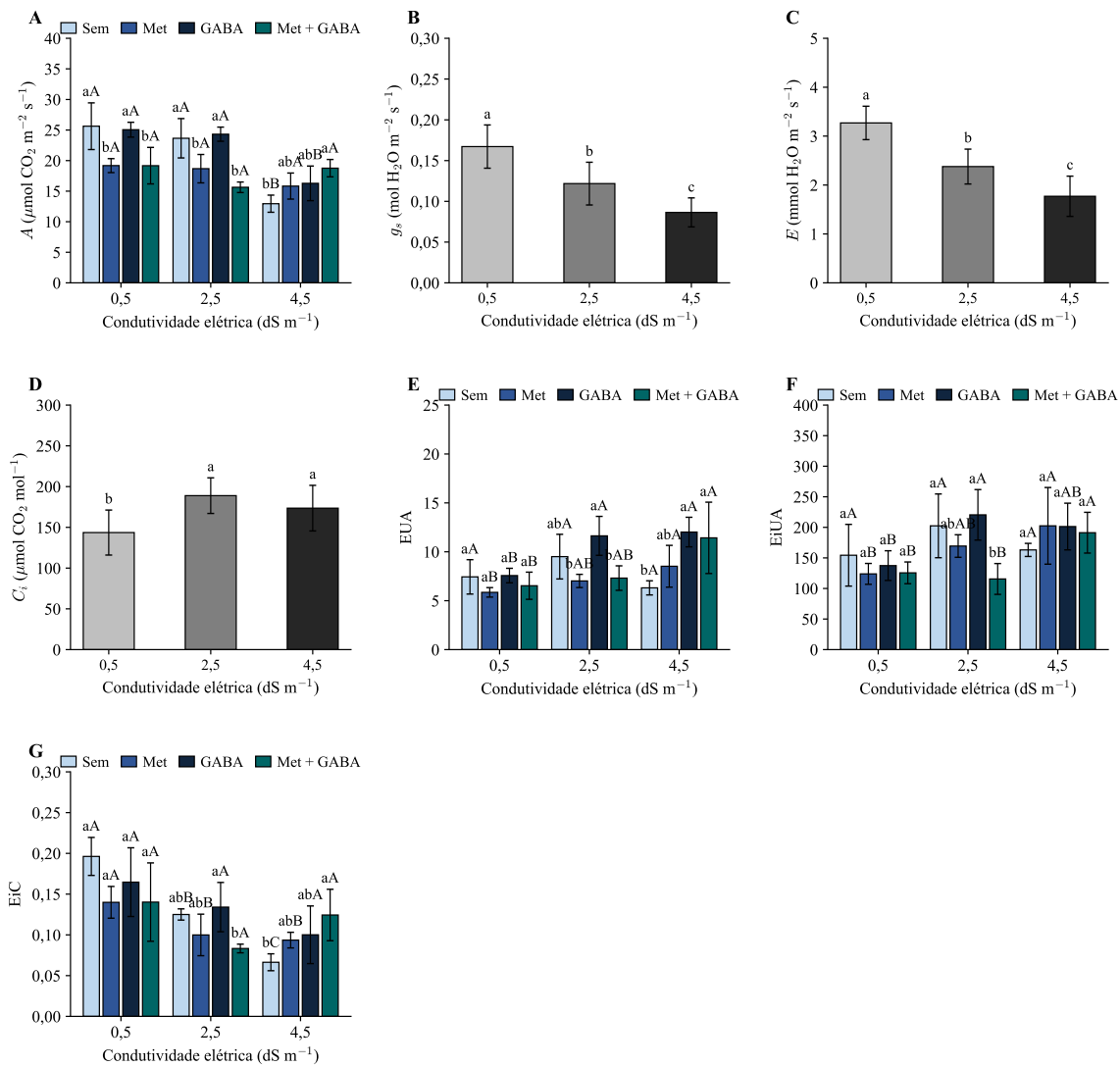


Figura 2 - Taxa de assimilação líquida de CO₂ - A (A), condutância estomática - g_s (B), transpiração - E (C), concentração interna de CO₂ - C_i (D) Eficiência instantânea do uso da água – EUA (E), eficiência intrínseca do uso da água – EiUA (F) e eficiência de carboxilação – EiC (G) em plantas de rúcula de folha larga sob níveis de condutividade elétrica da água de irrigação (CEa: 0,5, 2,5 e 4,5 dS m⁻¹) e concentrações de metionina (0,3 mM), GABA (0,5 mM) e a combinação Met + GABA (0,3 + 0,5 mM). Fonte: O autor (2026). Médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas não diferem para os bioestimulantes dentro de cada nível salino, e médias seguidas das mesmas letras maiúsculas não diferem para a salinidade da água de irrigação de acordo com ao teste de Tukey (p ≤ 0,05).

A redução da assimilação de CO₂ com o aumento da salinidade evidencia que o estresse salino compromete diretamente a capacidade fotossintética da rúcula, resultado da combinação entre estresse osmótico inicial e toxicidade iônica subsequente. Sob elevada condutividade elétrica, o acúmulo de Na⁺ interfere na homeostase celular e reduz a eficiência dos processos bioquímicos

associados à fotossíntese, particularmente a atividade da Rubisco e a regeneração da ribulose-1,5-bisfosfato (Ma *et al.*, 2025).

O incremento da assimilação de CO₂ observado nos tratamentos com GABA e, de forma mais eficiente, com a aplicação combinada de Met + GABA sob alta salinidade indica que esses bioestimulantes contribuíram para a manutenção da eficiência fotossintética em condições adversas (Khanna *et al.*, 2021). Esse comportamento sugere que a ação desses compostos favoreceu a continuidade do metabolismo do carbono, possivelmente por meio do ajuste osmótico e da proteção dos componentes fotossintéticos, conforme descrito para o GABA como molécula sinalizadora metabólica e, para a metionina, como precursora de compostos antioxidantes (Qiu *et al.*, 2024; Alnusaire, 2026).

Não houve interação entre os bioestimulantes para a condutância estomática (gs), transpiração (E) e concentração interna de CO₂ (Ci) (Figura B-D), sendo observados apenas os efeitos da salinidade da água de irrigação. A gs caiu de 0,167 mol H₂O m⁻² s⁻¹ (em 0,5 dS m⁻¹) para 0,122 mol H₂O m⁻² s⁻¹ em 2,5 dS m⁻¹ e 0,086 mol H₂O m⁻² s⁻¹ em 4,5 dS m⁻¹, correspondendo a uma redução acumulada de 48,5% (Figura B). A E foi influenciada exclusivamente pela salinidade. Os valores médios de E caíram de 3,27 mmol H₂O m⁻² s⁻¹ em 0,5 dS m⁻¹ para 2,38 mmol H₂O m⁻² s⁻¹ em 2,5 dS m⁻¹ e 1,77 mmol H₂O m⁻² s⁻¹ em 4,5 dS m⁻¹, representando redução total de 45,9% (Figura C). A Ci apresentou apenas efeito da salinidade. Os valores médios de Ci aumentaram de 143,6 µmol CO₂ mol⁻¹ em 0,5 dS m⁻¹ para 188,4 µmol CO₂ mol⁻¹ em 2,5 dS m⁻¹ e 173,6 µmol CO₂ mol⁻¹ em 4,5 dS m⁻¹ (Figura D).

A redução progressiva da condutância estomática com o aumento da salinidade confirma que o fechamento estomático constitui uma das primeiras respostas das plantas ao estresse salino, atuando como mecanismo de conservação de água frente à diminuição do potencial osmótico do solo. Esse ajuste, embora reduza a perda de água por transpiração, limita a difusão de CO₂ para o interior da folha, impactando diretamente a fotossíntese (Wang *et al.*, 2018). A ausência de efeito dos bioestimulantes sobre a condutância estomática indica que a mitigação do estresse promovida por metionina e GABA não ocorreu via modulação estomática direta, mas por mecanismos predominantemente não estomáticos, relacionados à eficiência metabólica e bioquímica da fotossíntese (Dabravolski; Isayenkov, 2023a).

O decréscimo da transpiração em virtude da salinidade está diretamente associado à redução da condutância estomática, refletindo uma estratégia adaptativa para minimizar a perda de água

sob condições de estresse osmótico (Li; Si; Ren, 2024). Esse comportamento é amplamente descrito em plantas submetidas à salinidade e representa um ajuste fisiológico conservativo, porém acompanhado de limitações no crescimento e na assimilação de carbono (Alghamdi, 2024). A ausência de interação entre bioestimulantes e salinidade para a transpiração reforça a interpretação de que metionina e GABA não atuaram diretamente sobre o controle estomático, mas favoreceram a eficiência do uso da água por meio de ajustes metabólicos internos (Zhang *et al.*, 2025).

O aumento da concentração interna de CO₂ com o incremento da salinidade indica que as limitações à fotossíntese foram predominantemente de natureza não estomática. Mesmo com menor abertura estomática, o acúmulo de CO₂ no mesófilo sugere redução da capacidade bioquímica de fixação do carbono, especialmente da atividade da Rubisco (Zuo *et al.*, 2024). Esse padrão confirma que, sob estresse salino, a fotossíntese é comprometida não apenas pela restrição difusiva, como também por alterações metabólicas associadas à toxicidade iônica e ao estresse oxidativo (Younis; Mansour, 2024).

A eficiência instantânea do uso da água (EUA) apresentou interação significativa (Figura 2E). Em 0,5 dS m⁻¹, os valores variaram de 5,85 (metionina) a 7,57 (GABA), com redução de 21,3% no tratamento com metionina em relação ao maior valor. Em 2,5 dS m⁻¹, o tratamento com GABA apresentou o maior valor (11,63), superando o tratamento sem bioestimulante (9,51) em 22,3%. Sob 4,5 dS m⁻¹, o maior valor foi observado no tratamento com GABA (12,02), representando incremento de 90,4% em relação ao tratamento sem bioestimulante (6,31) (Figura 2E).

O aumento da eficiência instantânea do uso da água nos tratamentos com GABA e Met + GABA, especialmente sob salinidade elevada, demonstra que esses bioestimulantes promoveram maior assimilação de carbono por unidade de água transpirada. Esse ajuste fisiológico é fundamental para a sobrevivência e produtividade das plantas em ambientes salinos, onde a disponibilidade hídrica funcional é limitada (Hayat *et al.*, 2023). O GABA contribui para esse processo ao atuar na regulação osmótica e na sinalização do estresse, permitindo maior eficiência metabólica mesmo sob redução da transpiração (Sheteiwy *et al.*, 2019).

Na eficiência intrínseca do uso da água (EiUA, Figura 2F), houve interação significativa entre os fatores. Em 0,5 dS m⁻¹, a EiUA variou de 123,88 (metionina) a 154,37 (sem bioestimulante). Em 2,5 dS m⁻¹, o maior valor foi observado no tratamento com GABA (220,48), superando o controle (202,47) em 8,9%. Sob 4,5 dS m⁻¹, os tratamentos com GABA (201,33) e

metionina (202,47) apresentaram os maiores valores, ao passo que o tratamento sem bioestimulante apresentou 163,07, representando redução de 19,0% (Figura 2F).

A elevação da eficiência intrínseca do uso da água nos tratamentos atenuados indica que as plantas foram capazes de manter maior assimilação de CO₂ mesmo com restrição estomática. Esse comportamento reforça a interpretação de que metionina e GABA atuaram melhorando a eficiência bioquímica da fotossíntese, reduzindo os efeitos negativos da salinidade sobre o metabolismo do carbono (Petrík *et al.*, 2023). Sob alta salinidade, a manutenção de valores elevados de EiUA nos tratamentos com bioestimulantes evidencia um ajuste fisiológico altamente favorável, diretamente relacionado à maior tolerância ao estresse (Dubey; Misra, 2025).

A eficiência de carboxilação (EiC) apresentou interação significativa (Figura 2G). Em 0,5 dS m⁻¹, o tratamento sem bioestimulante apresentou o maior valor (0,196), ao passo que a aplicação de metionina (0,139) reduziu a eficiência em 28,7%. Em 2,5 dS m⁻¹, o maior valor foi observado no tratamento sem bioestimulante (0,125), ao passo que Met + GABA apresentou o menor (0,083), com redução de 33,4%. Sob 4,5 dS m⁻¹, o tratamento Met + GABA apresentou o maior valor (0,124), representando incremento de 87,4% em relação ao tratamento sem bioestimulante (0,066) (Figura 2G).

A eficiência de carboxilação apresentou redução acentuada nos tratamentos sem bioestimulantes sob salinidade elevada, refletindo a diminuição da atividade da Rubisco e da regeneração de substratos fotossintéticos. Esse efeito é típico de condições de estresse salino severo, nas quais o metabolismo bioquímico da fotossíntese é diretamente afetado (Gao *et al.*, 2025). O aumento significativo da EiC no tratamento combinado Met + GABA sob alta salinidade indica preservação da capacidade de fixação de carbono, reforçando a ação sinérgica desses compostos na proteção do aparato fotossintético. Esse resultado explica, em nível mecanístico, os incrementos observados na assimilação de CO₂, no crescimento vegetativo e na produção de biomassa ao longo do experimento (Aljuaid; Ashour, 2022).

A fluorescência máxima da clorofila (Fm) foi influenciada pela aplicação dos bioestimulantes, não sendo observada interação com os níveis de salinidade da água de irrigação (Figura 3A). Considerando as médias gerais, plantas sem aplicação de bioestimulantes apresentaram valor médio de Fm de 32.435,4, ao passo que a aplicação de metionina e GABA promoveu aumento dessa variável (Figura 3A). Em plantas tratadas com metionina, o valor médio de Fm foi de 34.550,0, correspondendo a um incremento de 6,5% em relação ao tratamento sem

bioestimulantes. A aplicação de GABA resultou em valor médio de 34.505,5, representando aumento de 6,4% (Figura 3A). O tratamento combinado Met + GABA apresentou o maior valor médio de Fm (36.909,7), o que corresponde a um incremento de 13,8% em comparação ao tratamento sem bioestimulantes (Figura 3A).

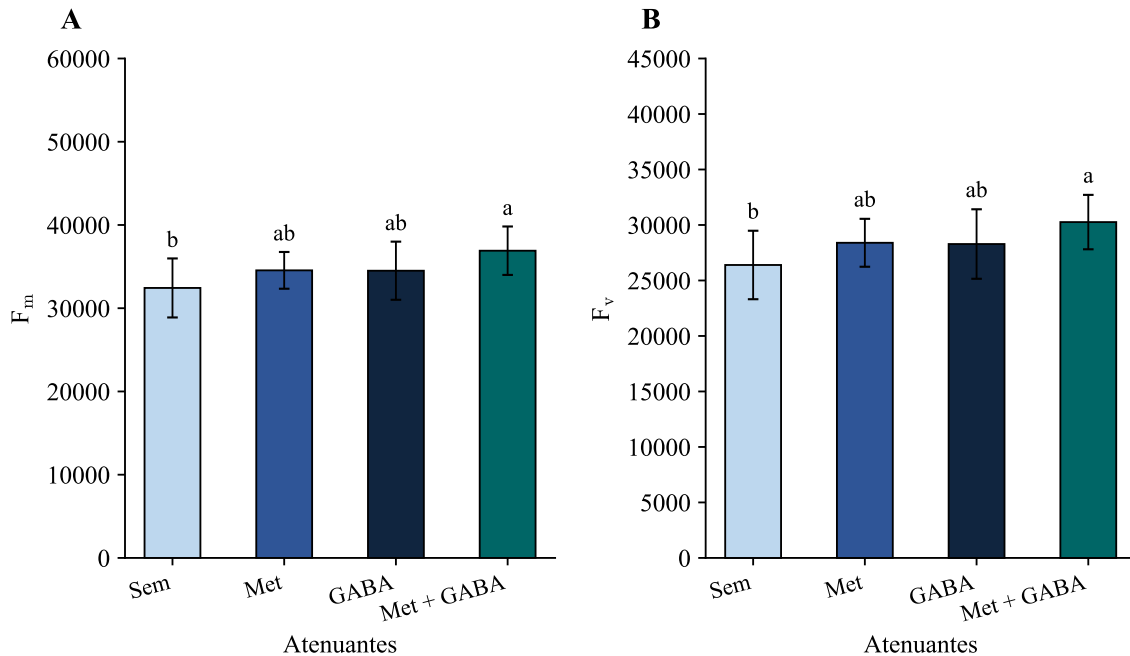


Figura 3 - Fluorescência máxima - Fm (A) e fluorescência variável - Fv (B) em plantas de rúcula de folha larga sob níveis de condutividade elétrica da água de irrigação (CEa: 0,5, 2,5 e 4,5 dS m⁻¹) e concentrações de metionina (0,3 mM), GABA (0,5 mM) e combinação Met + GABA (0,3 + 0,5 mM). Fonte: O autor (2026). Médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas não diferem para os bioestimulantes dentro de cada nível salino, e médias seguidas das mesmas letras maiúsculas não diferem para a salinidade da água de irrigação de acordo com ao teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

A ausência de interação entre salinidade e aplicação de bioestimulantes indica que os efeitos observados sobre a fluorescência da clorofila estão associados predominantemente à ação direta da metionina e do GABA sobre o aparato fotossintético, independentemente da intensidade do estresse salino imposto pela água de irrigação. O aumento da fluorescência máxima (Fm) observado nos tratamentos com bioestimulantes indica maior integridade estrutural do fotossistema II (FSII), uma vez que essa variável reflete a capacidade máxima de emissão de fluorescência quando todos os centros de reação estão fechados. Valores mais elevados de Fm sugerem menor ocorrência de danos nos complexos antena e nos centros de reação do FSII, condição favorável à manutenção da eficiência fotossintética (Makhtoum *et al.*, 2023; Jiao; Hu, 2025).

Comportamento semelhante foi observado para a fluorescência variável (Fv) (Figura 3B). O tratamento sem aplicação de bioestimulantes apresentou valor médio de 26.396,4, ao passo que a aplicação de metionina e GABA promoveu aumentos significativos dessa variável (Figura 3B). A metionina resultou em valor médio de 28.395,8, correspondendo a um incremento de 7,6%, enquanto o GABA promoveu valor médio de 28.283,7, representando aumento de 7,1% (Figura 3B), e a aplicação combinada de metionina e GABA apresentou o maior valor médio de Fv (30.261,5), correspondendo a um incremento de 14,6% em relação ao tratamento sem bioestimulantes, evidenciando efeito aditivo dos compostos sobre a capacidade fotoquímica potencial do fotossistema II (Figura 3B).

O aumento da fluorescência variável (Fv) evidencia maior capacidade potencial de conversão da energia luminosa absorvida em energia fotoquímica. A maior resposta observada no tratamento combinado Met + GABA sugere que esses compostos atuam de forma complementar na preservação da funcionalidade do FSII, promovendo maior estabilidade das proteínas e das membranas tilacoidais sob condições de estresse abiótico (Kalorizou *et al.*, 2024).

O efeito positivo do GABA sobre Fm e Fv está associado à sua participação na regulação metabólica e na mitigação de danos foto-oxidativos, contribuindo para a manutenção da integridade do aparato fotossintético. A metionina, por sua vez, pode favorecer a estabilidade estrutural das proteínas do FSII e a proteção contra processos oxidativos, o que explica o efeito aditivo observado quando ambos os bioestimulantes são aplicados em conjunto (Ullah *et al.*, 2023; Henderson; Sanderson; Fowles, 2025).

Houve interação significativa entre a salinidade da água de irrigação e a aplicação de bioestimulantes para os teores de clorofila a, clorofila b e clorofila total (Figura 4A–C). Em CEa 0,5 dS m⁻¹, a aplicação de bioestimulantes resultou na redução dos teores de clorofilas em relação ao tratamento sem bioestimulantes. O tratamento com GABA promoveu redução de 31,3% na clorofila a, 32,5% na clorofila b e 31,6% na clorofila total. Reduções semelhantes foram observadas com metionina (23,9%, 29,8% e 25,5%, respectivamente) e Met + GABA (33,4%, 34,6% e 33,7% respectivamente) (Figura 4A–C). Sob CEa 2,5 dS m⁻¹, o comportamento foi distinto. A aplicação de GABA promoveu incremento de 34,8% na clorofila a, 30,6% na clorofila b e 33,7% na clorofila total em relação ao tratamento sem bioestimulantes. Em contraste, a metionina e a combinação Met + GABA resultaram em reduções médias de aproximadamente 10% nos teores de clorofilas quando comparadas ao controle salino (Figura 4A–C). Em CEa 4,5 dS m⁻¹, observou-se efeito positivo

mais consistente da aplicação combinada. O tratamento Met + GABA promoveu incremento de 14,3% na clorofila a, 11,9% na clorofila b e 13,6% na clorofila total em relação ao tratamento sem bioestimulantes. A metionina isolada resultou em aumentos de 8,0%, 9,1% e 8,3%, respectivamente, ao passo que o GABA manteve valores semelhantes ao controle salino (Figura 4A–C).

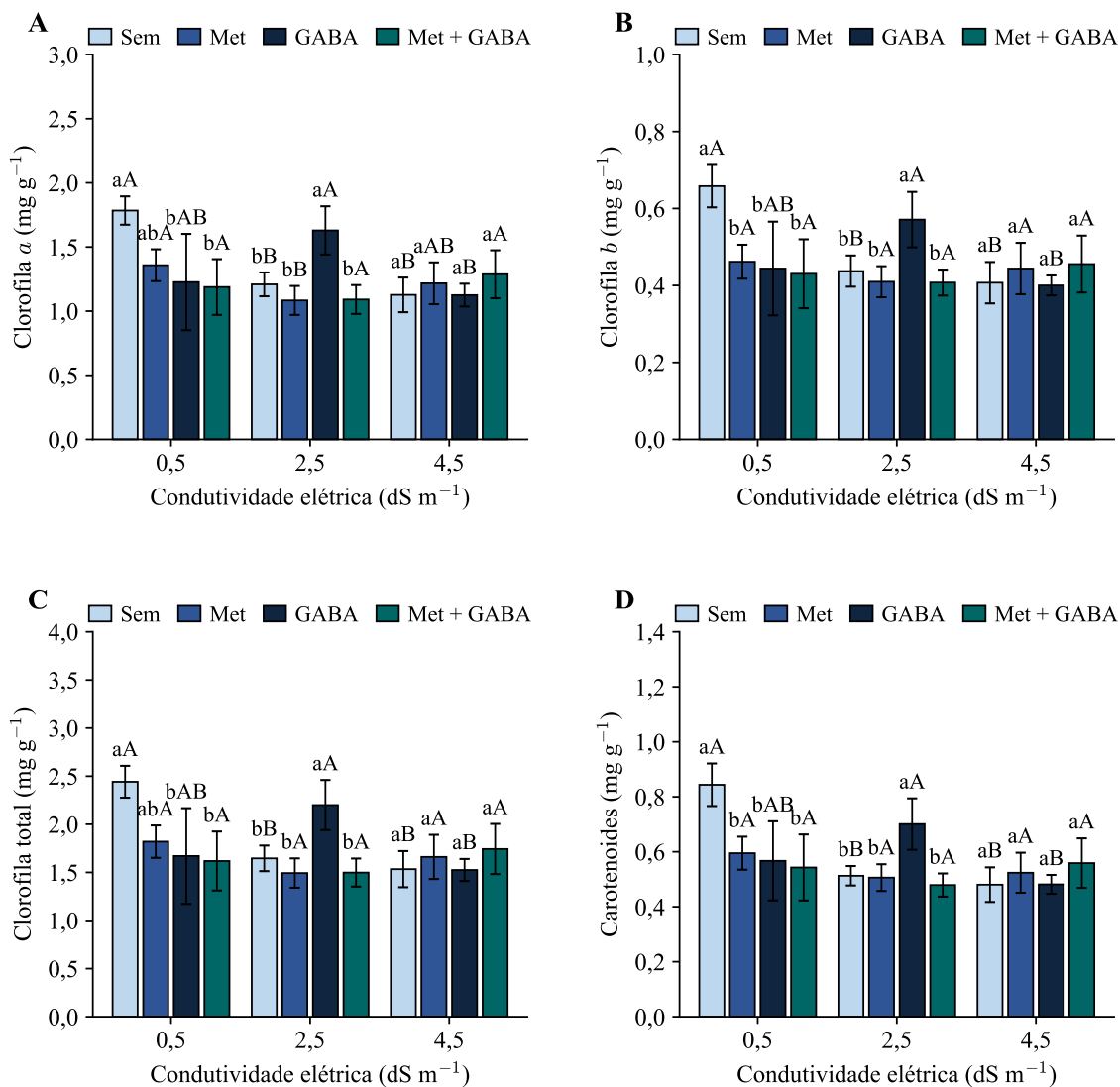


Figura 4 - Clorofila a (A), clorofila b (B), clorofila total (C) e carotenoides (D) em plantas de rúcula de folha larga sob níveis de condutividade elétrica da água de irrigação (CEa: 0,5, 2,5 e 4,5 dS m^{-1}) e concentrações de metionina (0,3 mM), GABA (0,5 mM) e a combinação Met + GABA (0,3 + 0,5 mM). Fonte: O autor (2026). Médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas não diferem para os bioestimulantes dentro de cada nível salino, e médias seguidas das mesmas letras

maiúsculas não diferem para a salinidade da água de irrigação de acordo com ao teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

A interação significativa entre salinidade da água de irrigação e aplicação de bioestimulantes para todos os pigmentos fotossintéticos evidencia que a resposta da rúcula ao estresse salino é dependente tanto da intensidade do estresse quanto da presença de compostos capazes de modular o metabolismo fotossintético. Esse padrão indica que a salinidade afeta diretamente a síntese e a estabilidade dos pigmentos, ao passo que os bioestimulantes influenciam a capacidade da planta em manter a integridade do aparato fotossintético sob condições adversas (Zahra *et al.*, 2022).

Sob baixa salinidade, a redução dos teores de clorofilas e carotenoides observada com a aplicação dos bioestimulantes sugere que, em condições próximas ao ótimo fisiológico, esses compostos não atuam como estimuladores diretos da síntese de pigmentos. Em ambientes não limitantes, a aplicação exógena de aminoácidos e compostos relacionados pode redirecionar o metabolismo vegetal para outras rotas bioquímicas, sem necessariamente resultar em incremento do conteúdo de pigmentos fotossintéticos (Wang *et al.*, 2017; Haghighi; Sadeghabad; Abolghasemi, 2022).

Em condições de salinidade moderada, o incremento nos teores de clorofila a, clorofila b e clorofila total promovido pelo GABA indica maior preservação dos pigmentos fotossintéticos. Esse efeito está associado à capacidade do GABA em atuar na regulação metabólica e na mitigação do estresse oxidativo, reduzindo a degradação das clorofilas e favorecendo a estabilidade das membranas dos tilacoides, conforme descrito para plantas submetidas a diferentes tipos de estresses abióticos (Qian *et al.*, 2024).

Sob elevada salinidade, a resposta positiva mais consistente observada com a aplicação combinada de metionina e GABA sugere efeito complementar desses compostos na proteção do aparato fotossintético. A metionina desempenha papel central no metabolismo do enxofre e na síntese de moléculas antioxidantes, enquanto o GABA contribui para o ajuste metabólico e osmótico, resultando em maior capacidade de manutenção dos pigmentos fotossintéticos em ambientes altamente salinos (Jin *et al.*, 2019; Badr *et al.*, 2024).

Para os carotenoides, também foi observada interação significativa entre os fatores avaliados (Figura 4D). Em CEa $0,5 \text{ dS m}^{-1}$, a aplicação de GABA, metionina e Met + GABA resultou em reduções de 32,8%, 29,5% e 35,7%, respectivamente, em relação ao tratamento sem

bioestimulantes (Figura 4D). Em CEa 2,5 dS m⁻¹, o GABA promoveu incremento de 36,7% no teor de carotenoides em relação ao controle, enquanto a metionina e Met + GABA resultaram em reduções de 1,3% e 6,6%, respectivamente (Figura 4D). Sob CEa 4,5 dS m⁻¹, a aplicação de metionina e Met + GABA promoveu incrementos de 9,0% e 16,3%, respectivamente, em comparação ao tratamento sem bioestimulantes, indicando maior ativação dos mecanismos de fotoproteção sob salinidade elevada (Figura 4D).

O aumento dos teores de carotenoides sob salinidade moderada e elevada, especialmente nos tratamentos com bioestimulantes, reforça o papel desses pigmentos na fotoproteção. Os carotenoides atuam na dissipação do excesso de energia luminosa e na neutralização de espécies reativas de oxigênio, reduzindo os danos foto-oxidativos ao fotossistema II, mecanismo amplamente documentado em plantas sob estresse salino (Caferri *et al.*, 2022).

De forma integrada, os resultados de pigmentos fotossintéticos demonstram que a aplicação exógena de metionina e GABA modula a resposta da rúcula ao estresse salino de maneira dependente da intensidade do estresse, contribuindo para a preservação dos pigmentos e para a manutenção do funcionamento do aparato fotossintético, especialmente sob condições moderadas e elevadas de salinidade, conforme também observado em outras espécies vegetais sob estresses abióticos (Feng *et al.*, 2024).

Houve interação significativa entre a salinidade da água de irrigação e a aplicação de bioestimulantes para a altura de planta (Figura 5A). Em CEa 0,5 dS m⁻¹, plantas sem bioestimulantes apresentaram altura média de 23,50 cm, ao passo que a aplicação de Met + GABA elevou esse valor para 24,00 cm, representando incremento de 2,1% (Figura 5A). Sob CEa 2,5 dS m⁻¹, a altura média foi de 25,00 cm no tratamento sem bioestimulantes, enquanto plantas tratadas com GABA apresentaram 25,67 cm, correspondendo a aumento de 2,7% (Figura 5A). Na CEa 4,5 dS m⁻¹, a altura de plantas sem bioestimulantes foi de 18,33 cm, sendo elevada para 23,33 cm com a aplicação de Met + GABA, o que representa incremento de 27,3%, evidenciando maior eficiência dos bioestimulantes sob elevada salinidade (Figura 5A).

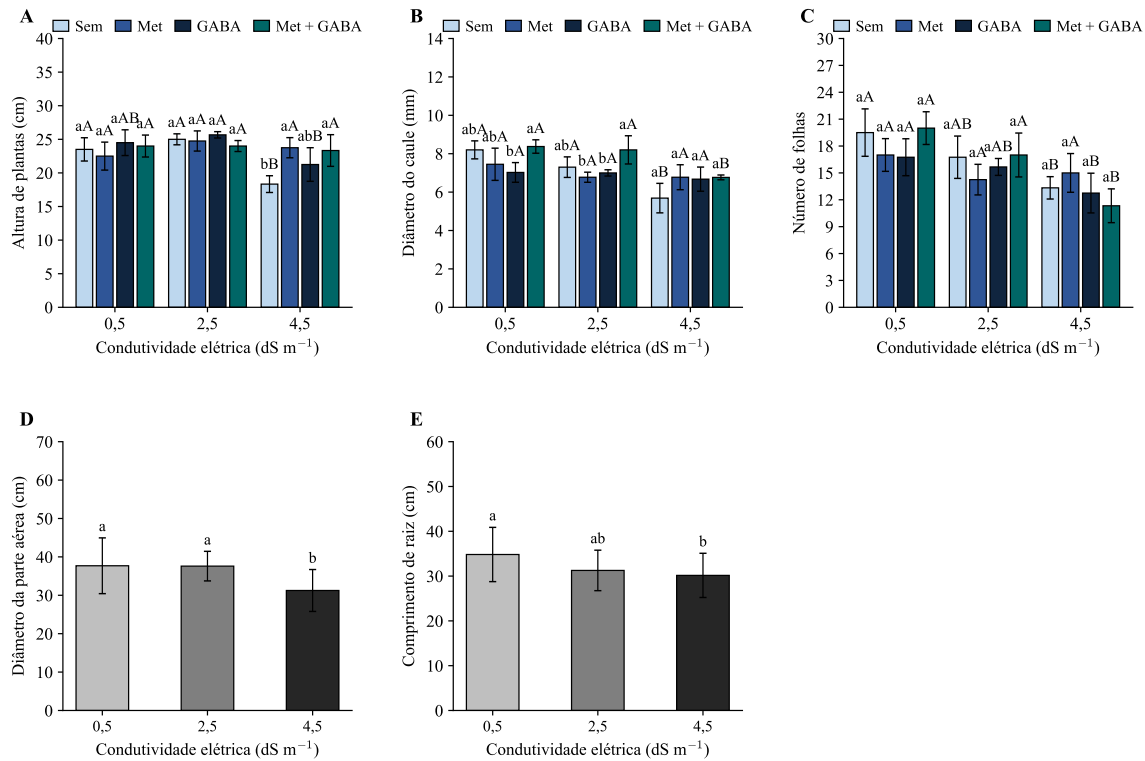


Figura 5 - Altura de planta (A), diâmetro do caule (B), número de folhas (C), diâmetro da parte aérea (D) e comprimento de raiz (E) em plantas de rúcula de folha larga sob níveis de condutividade elétrica da água de irrigação (CEa: 0,5, 2,5 e 4,5 dS m⁻¹) e concentrações de metionina (0,3 mM), GABA (0,5 mM) e a combinação Met + GABA (0,3 + 0,5 mM). Fonte: O autor (2025). Médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas não diferem para os bioestimulantes dentro de cada nível salino, e médias seguidas das mesmas letras maiúsculas não diferem para a salinidade da água de irrigação de acordo com ao teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Os incrementos na altura de plantas observados com a aplicação de metionina e GABA, especialmente sob salinidade moderada e elevada, indicam maior capacidade de manutenção da expansão celular sob estresse salino. A redução da altura em plantas não tratadas sob elevada salinidade está associada à limitação osmótica e à redução da turgidez celular, fatores que comprometem o alongamento celular. A aplicação de metionina contribui para mitigar esses efeitos, favorecendo o crescimento em altura, conforme descrito para plantas submetidas a estresses salinos e osmóticos (Zarbakhsh; Shahsavari, 2023).

Para o diâmetro do caule (figura 5B), observou-se interação significativa entre os fatores avaliados. Em CEa 0,5 dS m⁻¹, o diâmetro médio foi de 8,20 mm no tratamento sem bioestimulantes e de 8,38 mm com a aplicação de Met + GABA, correspondendo a incremento de 2,2% (Figura 5B). Sob CEa 2,5 dS m⁻¹, o diâmetro do caule foi de 7,30 mm no controle, aumentando para 8,20

mm com Met + GABA, o que representa incremento de 12,3% (Figura 5B). Em CEa 4,5 dS m⁻¹, plantas sem bioestimulantes apresentaram diâmetro médio de 5,69 mm, ao passo que a aplicação de Met + GABA elevou esse valor para 6,77 mm, um incremento de 19,0% (Figura 5B).

O aumento do diâmetro do caule com a aplicação de metionina e GABA sob salinidade moderada e elevada sugere maior robustez estrutural da planta e melhor funcionamento do metabolismo primário. O diâmetro do caule é uma variável sensível ao estado hídrico e à disponibilidade de assimilados, sendo diretamente afetado pela salinidade. A preservação dessa variável em plantas tratadas indica maior eficiência no uso de recursos metabólicos e melhor equilíbrio fisiológico sob estresse, conforme observado em estudos com aplicação de aminoácidos em plantas sob salinidade (Silva *et al.*, 2025).

O número de folhas (Figura 5C) também apresentou interação significativa entre salinidade e bioestimulantes. Em CEa 0,5 dS m⁻¹, plantas sem aplicação de bioestimulantes apresentaram média de 19,50 folhas, ao passo que a aplicação de Met + GABA resultou em 20,00 folhas, representando incremento de 2,6% (Figura 5C). Sob CEa 2,5 dS m⁻¹, o número médio de folhas foi de 16,75 no tratamento controle e 17,00 com Met + GABA, correspondendo a incremento de 1,5% (figura 5C). Em CEa 4,5 dS m⁻¹, plantas sem bioestimulantes apresentaram 13,33 folhas, ao passo que a aplicação de Met + GABA resultou em 11,33 folhas, caracterizando redução de 15,0%, indicando que, sob salinidade elevada, o incremento em altura e diâmetro do caule não foi acompanhado pelo aumento do número de folhas (figura 5C).

A resposta diferenciada do número de folhas à aplicação de bioestimulantes, especialmente sob elevada salinidade, indica que o crescimento em altura e espessura do caule nem sempre é acompanhado pela emissão foliar. A redução do número de folhas sob estresse severo pode representar um mecanismo adaptativo da planta para reduzir a área transpirante e limitar a perda de água. Esse comportamento é amplamente descrito como estratégia de aclimação ao estresse salino, mesmo quando outras variáveis de crescimento são parcialmente preservadas (Liu; Jiang; Yuan, 2024).

Para o diâmetro da parte aérea (Figura 5D), não houve interação significativa entre a salinidade da água e os bioestimulantes, sendo observado apenas efeito isolado da salinidade. O diâmetro médio reduziu de 39,50 cm em CEa 0,5 dS m⁻¹ para 28,00 cm em CEa 4,5 dS m⁻¹, correspondendo à redução de 29,1%, independentemente da aplicação de metionina e GABA (Figura 5D).

A redução progressiva do diâmetro da parte aérea com o aumento da salinidade, independentemente da aplicação de bioestimulantes, evidencia o efeito osmótico direto da salinidade sobre a expansão dos tecidos foliares. A ausência de resposta aos bioestimulantes sugere que essa variável é fortemente controlada pela disponibilidade hídrica e pelo potencial osmótico do meio, sendo menos sensível à modulação metabólica promovida por metionina e GABA (Pandik *et al.*, 2024).

O comprimento de raiz (Figura 5E) também apresentou apenas efeito da salinidade da água de irrigação. Os valores médios reduziram de 33,15 cm sob CEa 0,5 dS m⁻¹ para 32,00 cm sob CEa 4,5 dS m⁻¹, representando redução de 3,5%, o que sugere menor sensibilidade dessa variável ao aumento da salinidade quando comparada às variáveis da parte aérea (Figura 5E).

O comprimento de raiz apresentou menor sensibilidade ao aumento da salinidade quando comparado às variáveis da parte aérea, o que indica possível priorização do crescimento radicular como estratégia adaptativa para exploração do solo. A ausência de efeito dos bioestimulantes sobre essa variável sugere que o crescimento em comprimento das raízes é predominantemente regulado pelo gradiente osmótico do solo, comportamento já relatado para espécies hortícolas sob estresse salino (Guo *et al.*, 2020).

Houve interação significativa entre a salinidade da água de irrigação e a aplicação de bioestimulantes para o conteúdo relativo de água (CRA) (Figura 6A). Em CEa 0,5 dS m⁻¹, plantas sem bioestimulantes apresentaram CRA médio de 61,43%. A aplicação de GABA elevou esse valor para 69,34%, representando incremento de 12,9%, ao passo que a metionina promoveu aumento mais expressivo, atingindo 78,47%, correspondente a incremento de 27,7% (Figura 6A). O tratamento Met + GABA apresentou CRA de 68,85%, incremento de 12,1% em relação ao controle. Sob CEa 2,5 dS m⁻¹, o CRA médio no tratamento sem bioestimulantes foi de 71,79%. A aplicação de GABA e metionina elevou o CRA para 73,05% e 75,16%, correspondendo a incrementos de 1,8% e 4,7%, respectivamente (Figura 6A). Em contraste, o tratamento Met + GABA reduziu o CRA para 66,88%, representando diminuição de 6,7%. Em CEa 4,5 dS m⁻¹, plantas sem bioestimulantes apresentaram CRA de 75,60%. A aplicação de GABA reduziu esse valor para 70,54%, ao passo que a metionina e Met + GABA promoveram reduções mais acentuadas, atingindo 63,07% e 60,09%, respectivamente (Figura 6A).

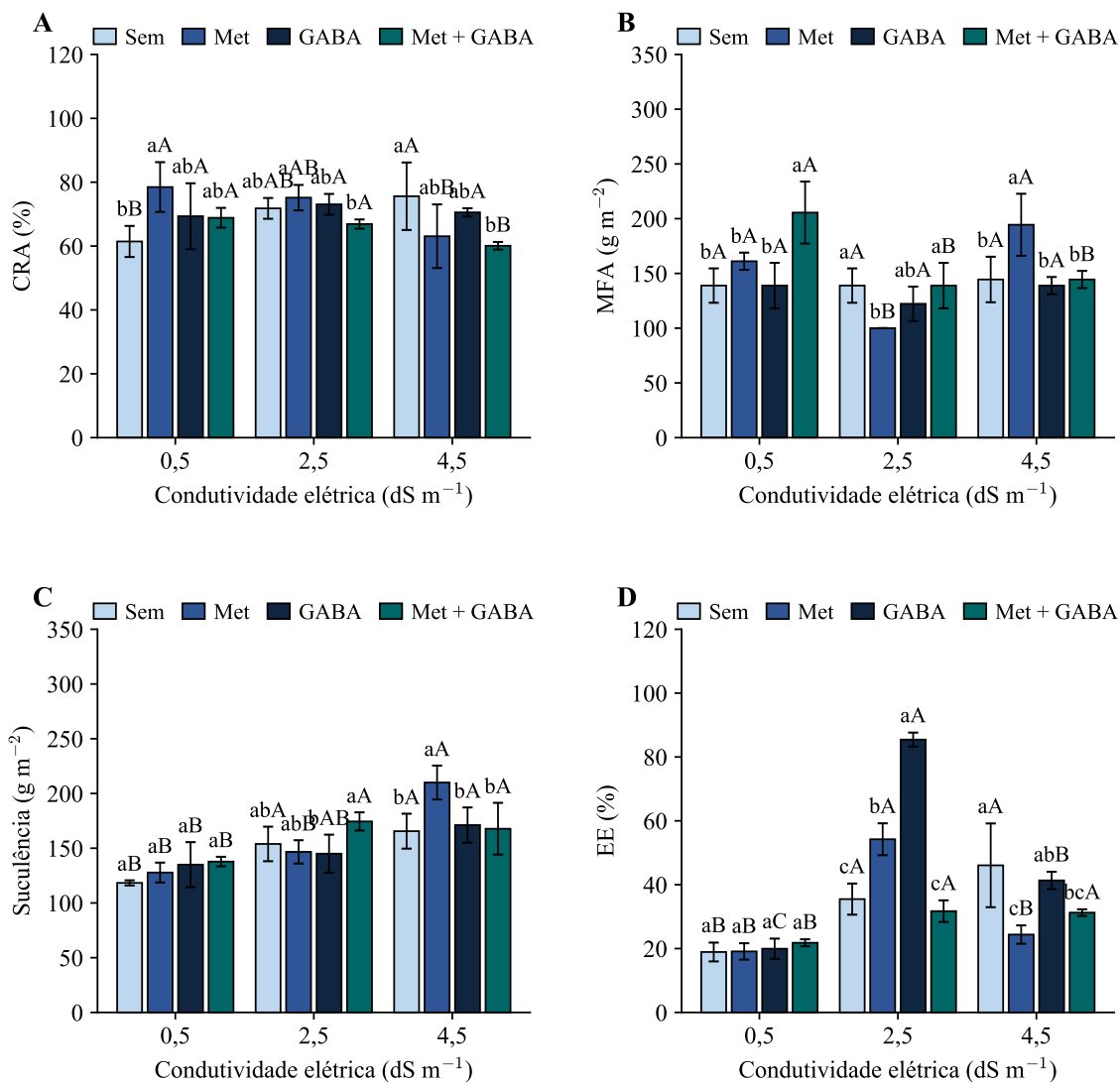


Figura 6 - Conteúdo relativo de água – CRA (A), massa foliar por área – MFA (B), suculência (C) e extravasamento de elétrons – EE (D) em plantas de rúcula de folha larga sob níveis de condutividade elétrica da água de irrigação (CEa: 0,5, 2,5 e 4,5 dS m⁻¹) e concentrações de metionina (0,3 mM), GABA (0,5 mM) e a combinação Met + GABA (0,3 + 0,5 mM). Fonte: O autor (2026). Médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas não diferem para os bioestimulantes dentro de cada nível salino, e médias seguidas das mesmas letras maiúsculas não diferem para a salinidade da água de irrigação de acordo com ao teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

As variações no CRA indicam que a aplicação de bioestimulantes modulou a capacidade de manutenção do estado hídrico das plantas de rúcula de forma dependente da intensidade do estresse salino. Incrementos no CRA sob baixa e moderada salinidade refletem maior retenção de água nos tecidos, ao passo que reduções sob elevada salinidade indicam limitação da eficiência dos

bioestimulantes em condições de estresse severo, comportamento amplamente descrito para plantas glicófitas (Cialli *et al.*, 2026).

Para a massa foliar por área, observou-se interação significativa entre os fatores avaliados (Figura 6B). No tratamento CEa 0,5 dS m⁻¹, o valor médio de MFA no tratamento sem bioestimulantes foi de 138,89 g m⁻². A aplicação de metionina aumentou a MFA para 161,11 g m⁻², correspondendo a incremento de 16,0%, ao passo que Met + GABA promoveu aumento expressivo para 205,56 g m⁻², equivalente a incremento de 48,0%. O GABA não alterou esse parâmetro em relação ao controle (Figura 6B). Sob CEa 2,5 dS m⁻¹, o valor médio de MFA no controle foi de 138,89 g m⁻². A aplicação de metionina reduziu a MFA para 100,00 g m⁻², correspondendo à redução de 28,0%, ao passo que o tratamento Met + GABA manteve valores semelhantes ao controle. O GABA reduziu a MFA em 12,0%, atingindo 122,22 g m⁻² (Figura 6B). Em CEa 4,5 dS m⁻¹, a MFA média no tratamento sem bioestimulantes foi de 144,44 g m⁻². A aplicação de metionina elevou esse valor para 194,44 g m⁻², representando incremento de 34,6%, ao passo que GABA e Met + GABA mantiveram valores semelhantes ao controle (Figura 6B).

O aumento da MFA, especialmente sob baixa e elevada salinidade, indica maior espessamento foliar e maior investimento estrutural das folhas. Esse ajuste morfofisiológico está associado à redução da perda de água e ao aumento da tolerância ao estresse salino, conforme relatado para espécies hortícolas sob salinidade (Yao *et al.*, 2023).

A suculência foliar também apresentou interação significativa entre salinidade e bioestimulantes (Figura 6C). Em CEa 0,5 dS m⁻¹, plantas sem bioestimulantes apresentaram suculência média de 118,33. A aplicação de GABA elevou esse valor para 135,00 (14,1%), metionina para 127,78 (8,0%) e Met + GABA para 137,78 (16,4%). Sob CEa 2,5 dS m⁻¹, a suculência média do controle foi de 153,89 (Figura 6C). O tratamento Met + GABA elevou esse valor para 174,44, correspondendo a incremento de 13,4%, ao passo que GABA e metionina reduziram levemente a suculência em 5,8% e 4,7%, respectivamente (Figura 6C). Em CEa 4,5 dS m⁻¹, a suculência média do controle foi de 165,56. A aplicação de metionina promoveu incremento expressivo para 210,00, correspondente a aumento de 26,8%, enquanto GABA e Met + GABA apresentaram incrementos modestos de 3,4% e 1,3%, respectivamente (Figura 6C).

O incremento da suculência sob salinidade moderada e elevada evidencia um mecanismo adaptativo clássico, no qual a planta aumenta o conteúdo hídrico por unidade de área foliar, contribuindo para diluição dos sais acumulados nos tecidos. A aplicação de bioestimulantes

potencializou esse mecanismo, especialmente sob condições de estresse mais intenso (Sogoni *et al.*, 2025).

Para o extravasamento de eletrólitos (EE), observou-se interação significativa entre os fatores (Figura 6D). Em CEa 0,5 dS m⁻¹, o EE médio no tratamento sem bioestimulantes foi de 18,92%. A aplicação de GABA, metionina e Met + GABA resultou em valores de 19,96%, 19,11% e 21,81%, correspondendo a aumentos de 5,5%, 1,0% e 15,3%, respectivamente (Figura 6D). Sob CEa 2,5 dS m⁻¹, o EE médio do controle foi de 35,49%. A aplicação de Met + GABA reduziu o EE para 31,72%, representando redução de 10,3%, enquanto a metionina promoveu redução mais acentuada, atingindo 54,23% (34,5%). O GABA elevou o EE para 85,44%, correspondendo a aumento de 140,7% (Figura 6D). Em CEa 4,5 dS m⁻¹, plantas sem bioestimulantes apresentaram EE médio de 46,07%. A aplicação de metionina reduziu esse valor para 24,38%, correspondendo a redução de 47,1%, enquanto Met + GABA reduziu para 31,26% (32,2%). O GABA promoveu redução mais discreta, atingindo 41,34% (10,3%) (Figura 6D).

A redução do extravasamento de eletrólitos nos tratamentos com metionina e Met + GABA sob elevada salinidade indica maior integridade das membranas celulares. Esse efeito sugere atuação dos bioestimulantes na mitigação dos danos oxidativos induzidos pela salinidade, reduzindo a peroxidação lipídica e preservando a estabilidade das membranas, conforme descrito na literatura (Su *et al.*, 2019).

Houve interação significativa entre a salinidade da água de irrigação e a aplicação de bioestimulantes para a massa seca da parte aérea (MASPA) (Figura 7A). Em CEa 0,5 dS m⁻¹, plantas sem bioestimulantes apresentaram MSPA média de 7,11 g por planta. A aplicação de metionina elevou esse valor para 5,53 g por planta (22,1%), enquanto o GABA resultou em 4,51 g por planta (36,5%). Em contraste, a aplicação combinada Met + GABA promoveu incremento expressivo, atingindo 8,86 g por planta, correspondente a aumento de 24,7% em relação ao controle (Figura 7A). Sob CEa 2,5 dS m⁻¹, a MSPA média no tratamento sem bioestimulantes foi de 6,32 g por planta. A aplicação de GABA reduziu esse valor para 5,68 g por planta (10,1%), enquanto a metionina apresentou valor semelhante (6,08 g por planta). O tratamento Met + GABA elevou a MASPA para 6,62 g por planta, representando incremento de 4,6% (Figura 7A). Em CEa 4,5 dS m⁻¹, plantas sem bioestimulantes apresentaram MASPA de 4,07 g por planta. A aplicação de metionina elevou esse valor para 4,70 g por planta (15,4%), enquanto Met + GABA promoveu

incremento para 5,18 g por planta, correspondente a aumento de 27,1%. O GABA isolado resultou em 4,52 g por planta (11,1%) (Figura 7A).

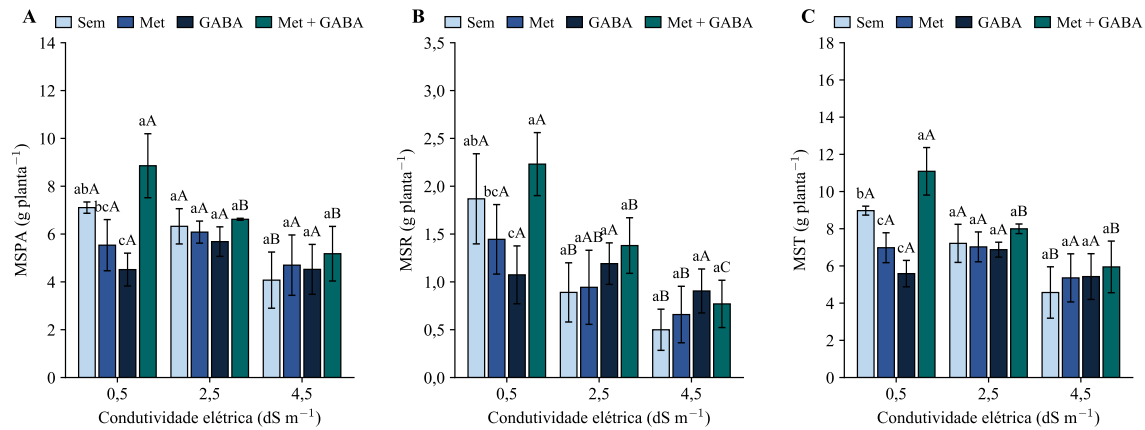


Figura 7 - Massa seca da parte aérea – MASP (A), massa seca da raiz – MSR (B) e massa seca total – MST (C) em plantas de rúcula de folha larga sob níveis de condutividade elétrica da água de irrigação (CEa: 0,5, 2,5 e 4,5 dS m⁻¹) e concentrações de metionina (0,3 mM), GABA (0,5 mM) e a combinação Met + GABA (0,3 + 0,5 mM). Fonte: O autor (2026). Médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas não diferem para os bioestimulantes dentro de cada nível salino, e médias seguidas das mesmas letras maiúsculas não diferem para a salinidade da água de irrigação de acordo com ao teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

A redução da massa seca da parte aérea observada em plantas não tratadas sob aumento da salinidade confirma o efeito negativo do estresse salino sobre a expansão foliar e a atividade fotossintética, refletindo-se diretamente na produção de biomassa. A aplicação de metionina e GABA, especialmente de forma combinada, reduziu os efeitos sob salinidade moderada e elevada, indicando maior eficiência na assimilação e na alocação de fotoassimilados. Esses resultados estão de acordo com relatos que associam a aplicação de aminoácidos e compostos reguladores à mitigação das limitações metabólicas impostas pelo estresse salino (Sá *et al.*, 2020).

Para a massa seca da raiz MSR, também foi observada interação significativa entre os fatores avaliados (Figura 7B). Em CEa 0,5 dS m⁻¹, a MSR média no tratamento sem bioestimulantes foi de 1,87 g planta⁻¹. A aplicação de metionina reduziu esse valor para 1,44 g planta⁻¹ (22,7%), enquanto o GABA resultou em 1,07 g planta⁻¹ (42,5%). A aplicação combinada Met + GABA promoveu incremento para 2,23 g por planta, representando aumento de 19,4% (Figura 7B). Sob CEa 2,5 dS m⁻¹, plantas sem bioestimulantes apresentaram MSR média de 0,89 g planta⁻¹. A aplicação de metionina elevou esse valor para 0,94 g planta⁻¹ (6,0%), enquanto o

GABA resultou em $1,19 \text{ g planta}^{-1}$, correspondente a incremento de 33,8% (Figura 7B). O tratamento Met + GABA apresentou $1,38 \text{ g planta}^{-1}$, representando aumento de 55,1% (Figura 7B). Em CEa $4,5 \text{ dS m}^{-1}$, a MSR média no controle foi de $0,50 \text{ g planta}^{-1}$. A aplicação de metionina elevou esse valor para $0,66 \text{ g planta}^{-1}$ (31,8%), enquanto Met + GABA promoveu incremento para $0,77 \text{ g planta}^{-1}$, correspondente a aumento de 54,1%. O GABA isolado resultou em $0,90 \text{ g planta}^{-1}$, representando incremento de 81,3% (Figura 7B).

O aumento da massa seca da raiz com a aplicação de bioestimulantes, particularmente sob salinidade moderada e elevada, indica maior investimento no sistema radicular como estratégia adaptativa. Esse comportamento favorece a exploração do solo e a absorção de água em ambientes salinos, onde a disponibilidade hídrica efetiva é reduzida. Estudos demonstram que o estímulo ao crescimento radicular é um dos principais mecanismos de tolerância ao estresse salino em plantas glicófitas, contribuindo para a manutenção do crescimento global da planta (Shelden; Munns, 2023).

A massa seca total (MST) refletiu o comportamento integrado da parte aérea e do sistema radicular, apresentando interação significativa entre salinidade e bioestimulantes (Figura 7C). Em CEa $0,5 \text{ dS m}^{-1}$, a MST média no tratamento sem bioestimulantes foi de $8,97 \text{ g planta}^{-1}$. A aplicação de metionina reduziu esse valor para $6,98 \text{ g planta}^{-1}$ (22,2%), enquanto o GABA resultou em $5,59 \text{ g planta}^{-1}$ (37,7%). Em contraste, a aplicação combinada Met + GABA elevou a MST para $11,09 \text{ g planta}^{-1}$, correspondente a incremento de 23,6% (Figura 7C). Sob CEa $2,5 \text{ dS m}^{-1}$, plantas sem bioestimulantes apresentaram MST média de $7,21 \text{ g planta}^{-1}$. A aplicação de metionina apresentou valor semelhante ($7,02 \text{ g planta}^{-1}$), enquanto o GABA reduziu a MST para $6,87 \text{ g planta}^{-1}$ (4,7%). O tratamento Met + GABA elevou a MST para $8,00 \text{ g planta}^{-1}$, representando incremento de 10,8% (Figura 7C). Em CEa $4,5 \text{ dS m}^{-1}$, a MST média no controle foi de $4,57 \text{ g planta}^{-1}$. A aplicação de metionina elevou esse valor para $5,36 \text{ g planta}^{-1}$ (17,2%), enquanto Met + GABA promoveu incremento mais expressivo, atingindo $5,95 \text{ g planta}^{-1}$, correspondente a aumento de 30,1%. O GABA isolado resultou em $5,43 \text{ g planta}^{-1}$ (18,7%) (Figura 7C).

A massa seca total reflete a integração das respostas da parte aérea e das raízes à salinidade e à aplicação de bioestimulantes. Os incrementos observados com a aplicação combinada de metionina e GABA, especialmente sob salinidade elevada, indicam maior capacidade da planta em manter o crescimento e a produtividade mesmo em condições adversas. Esse efeito integrado sugere que os bioestimulantes atuam de forma complementar na preservação de processos

fisiológicos essenciais, como fotossíntese, relações hídricas e integridade das membranas celulares, conforme amplamente descrito na literatura (Yuan *et al.*, 2023).

Na figura 8, pode-se observar evidentes diferenças morfológicas nas plantas de rúcula em resposta aos níveis de condutividade elétrica da água de irrigação e à aplicação dos bioestimulantes metionina, GABA e sua combinação. Sob baixa salinidade ($0,5 \text{ dS m}^{-1}$), as plantas apresentaram desenvolvimento vigoroso em todos os tratamentos, com maior expansão foliar, coloração verde intensa e sistema radicular bem formado (Figura 8). Ainda assim, observa-se incremento visual no porte da parte aérea e no volume radicular nas plantas tratadas com GABA e, principalmente, com Met + GABA, em comparação ao tratamento sem bioestimulante (Figura 8). Em salinidade moderada ($2,5 \text{ dS m}^{-1}$), as plantas sem bioestimulante apresentaram redução visível do crescimento da parte aérea, menor área foliar e sistema radicular menos desenvolvido (Figura 8).

A aplicação isolada de Met ou GABA atenuou parcialmente esses efeitos, enquanto o tratamento combinado MET + GABA promoveu maior manutenção do crescimento vegetativo, com folhas mais expandidas e raízes mais longas e ramificadas (Figura 8). Sob alta salinidade ($4,5 \text{ dS m}^{-1}$), os efeitos deletérios do estresse salino tornaram-se mais evidentes no tratamento sem bioestimulante, caracterizados por plantas de menor porte, folhas reduzidas e sistema radicular severamente comprometido (Figura 8). A aplicação de Met ou GABA isoladamente resultou em melhora visual moderada, enquanto o tratamento combinado Met + GABA destacou-se pela maior preservação da arquitetura da planta, com melhor desenvolvimento da parte aérea e maior integridade do sistema radicular (Figura 8).

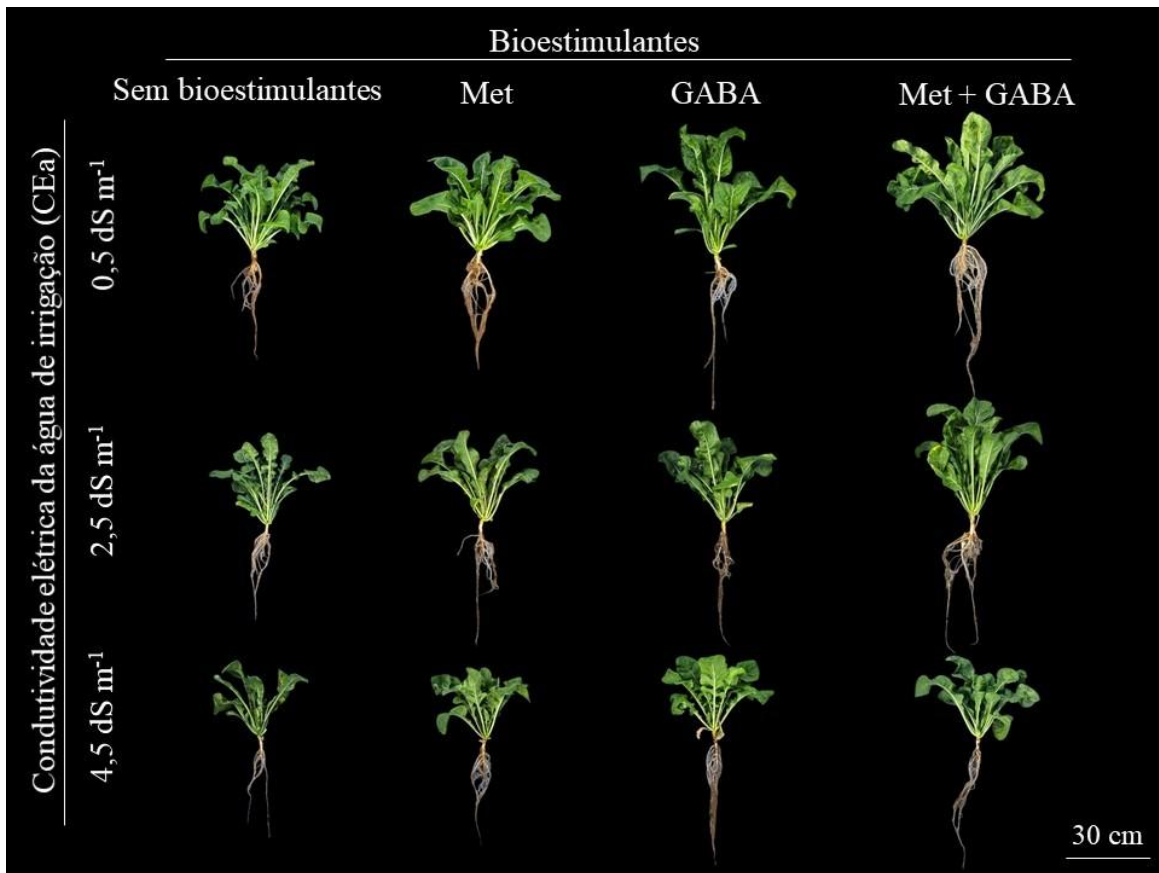


Figura 8 - Plantas de rúcula sob níveis de condutividade elétrica da água de irrigação (0,5; 2,5 e 4,5 dS m⁻¹) e concentrações de metionina (0,3 mM), GABA (0,5 mM) e a combinação Met + GABA (0,3 + 0,5 mM). Fonte: O autor (2025).

A resposta observada na Figura 8 confirma que o estresse salino comprometeu o crescimento da parte aérea e o desenvolvimento radicular da rúcula, refletindo provavelmente os efeitos combinados da restrição osmótica, toxicidade iônica e desbalanço nutricional induzidos pelo excesso de sais (Sun *et al.*, 2025).

A redução visual do porte das plantas e do sistema radicular nos tratamentos sem bioestimulante, sobretudo em 4,5 dS m⁻¹ (Figura 8), está diretamente associada à diminuição da eficiência fotossintética, ao aumento do extravasamento de eletrólitos e ao acúmulo de sódio previamente demonstrados nas análises fisiológicas e bioquímicas deste estudo. A limitação do crescimento radicular sob salinidade elevada compromete a absorção de água e nutrientes, intensificando o estresse hídrico e metabólico (Boussora *et al.*, 2024). A aplicação de metionina e GABA promoveu clara atenuação desses efeitos, evidenciada pela maior preservação da arquitetura vegetal. A metionina atua como precursora de compostos reguladores do crescimento e da defesa

antioxidante, contribuindo para a estabilidade metabólica e estrutural das plantas sob estresse (Ravanel *et al.*, 2004). O GABA, por sua vez, desempenha papel central no ajuste osmótico, na sinalização do estresse e na proteção das membranas celulares, favorecendo a manutenção do crescimento mesmo em ambientes salinos (Liu *et al.*, 2025).

O efeito superior do tratamento combinado Met + GABA sugere uma ação complementar entre esses compostos, integrando mecanismos de sinalização, proteção celular e reorganização metabólica. Essa resposta visual está em plena concordância com os resultados quantitativos de crescimento vegetativo, produção de biomassa, relações hídricas e metabolismo osmótico apresentados anteriormente, reforçando que a mitigação do estresse salino não ocorre por um único mecanismo, mas pela coordenação de múltiplos processos fisiológicos (Arif *et al.*, 2020).

Para os açúcares redutores totais (ART), foi observada interação significativa entre os fatores avaliados (Figura 9A). Em CEa 0,5 dS m⁻¹, o teor médio no tratamento sem bioestimulantes foi de 334,82 mg g⁻¹ MS (Figura 9A). A aplicação de metionina reduziu esse valor para 318,27 mg g⁻¹ MS (4,9%), enquanto o GABA resultou em 266,53 mg g⁻¹ MS (20,4%) (Figura 9A). A aplicação combinada Met + GABA promoveu 333,99 mg g⁻¹ MS, valor semelhante ao controle (redução de 0,2%). Sob CEa 2,5 dS m⁻¹, plantas sem bioestimulantes apresentaram média de 273,15 mg g⁻¹ MS. A aplicação de metionina elevou esse valor para 277,70 mg g⁻¹ MS (1,7%), enquanto o GABA resultou em 245,00 mg g⁻¹ MS (10,3%) (Figura 9A). O tratamento Met + GABA apresentou 264,46 mg g⁻¹ MS (3,2% de redução) (Figura 9A). Em CEa 4,5 dS m⁻¹, o controle apresentou 268,59 mg g⁻¹ MS (Figura 9A). A aplicação de metionina elevou para 276,46 mg g⁻¹ MS (2,9%), enquanto o GABA resultou em 286,39 mg g⁻¹ MS (6,6%). A combinação Met + GABA apresentou 261,56 mg g⁻¹ MS (2,6% de redução) (Figura 9A).

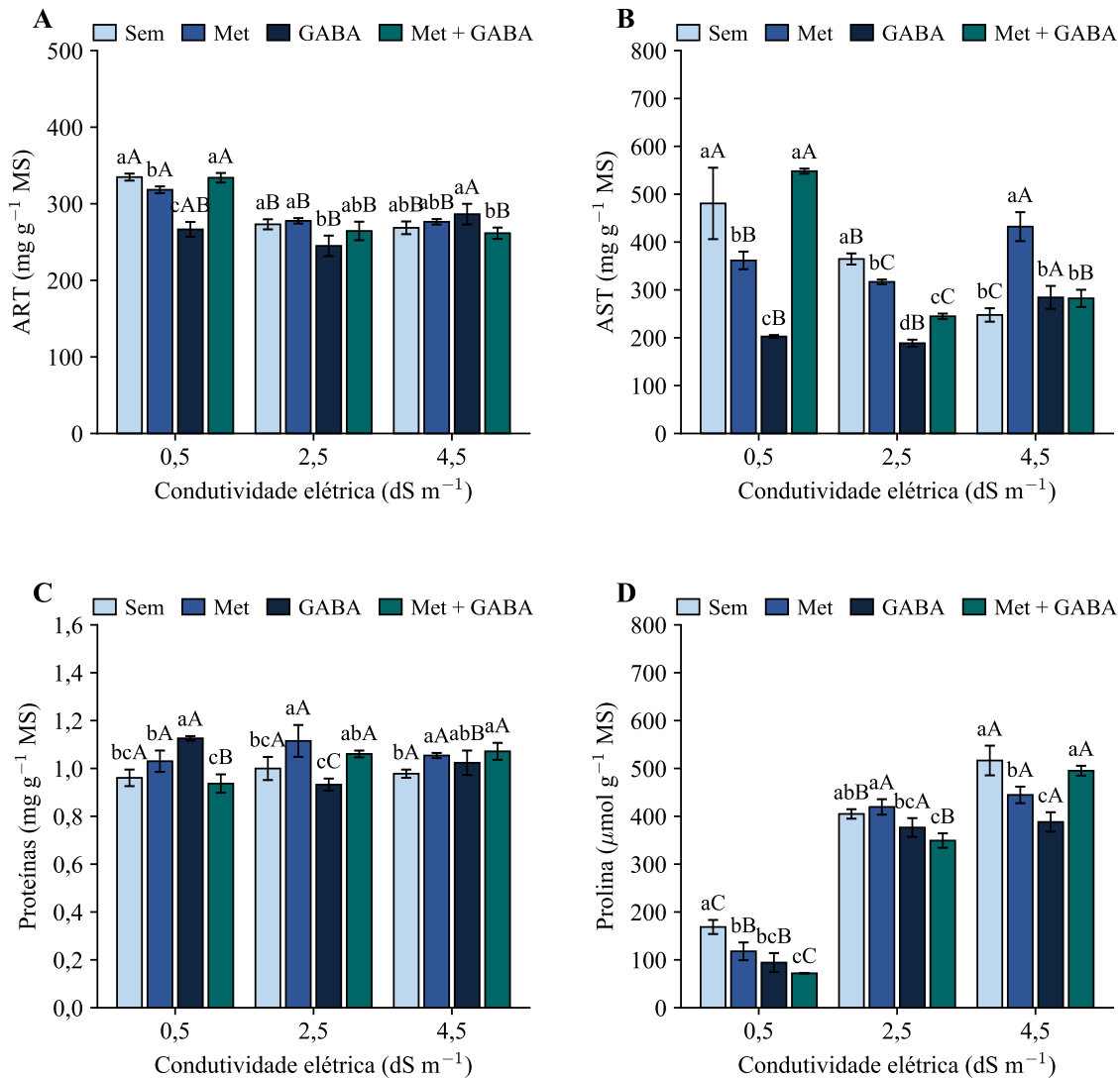


Figura 9 - Açúcares redutores totais – ART (A), açúcares solúveis totais – AST (B), proteínas (C) e prolina (D) em plantas de rúcula de folha larga sob níveis de condutividade elétrica da água de irrigação (CEa: 0,5, 2,5 e 4,5 dS m⁻¹) e concentrações de metionina (0,3 mM), GABA (0,5 mM) e a combinação Met + GABA (0,3 + 0,5 mM). Fonte: O autor (2026). Médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas não diferem para os bioestimulantes dentro de cada nível salino, e médias seguidas das mesmas letras maiúsculas não diferem para a salinidade da água de irrigação de acordo com ao teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

O aumento dos teores de açúcares redutores e solúveis totais sob salinidade moderada e elevada indica ativação de mecanismos osmóticos de ajuste, nos quais carboidratos atuam como osmólitos compatíveis, contribuindo para a manutenção do potencial osmótico celular. A aplicação de metionina e GABA potencializou esse acúmulo, especialmente sob maior estresse, comportamento amplamente descrito para plantas submetidas à salinidade (Arif *et al.*, 2020).

Para os açúcares solúveis totais (AST), também foi observada interação significativa (Figura 9B). Em CEa 0,5 dS m⁻¹, o controle apresentou 480,69 mg g⁻¹ MS. A metionina reduziu esse valor para 361,57 mg g⁻¹ MS (24,8%), enquanto o GABA apresentou 202,61 mg g⁻¹ MS (57,9%). A aplicação combinada Met + GABA elevou para 548,11 mg g⁻¹ MS, representando aumento de 14,0% (Figura 9B). Sob CEa 2,5 dS m⁻¹, o controle apresentou 364,59 mg g⁻¹ MS (Figura 9B). A metionina resultou em 316,77 mg g⁻¹ MS (13,1% de redução), o GABA em 188,61 mg g⁻¹ MS (48,3%), e a combinação Met + GABA em 244,83 mg g⁻¹ MS (32,8%) (Figura 9B). Em CEa 4,5 dS m⁻¹, o controle apresentou 247,63 mg g⁻¹ MS. A metionina elevou para 432,22 mg g⁻¹ MS (74,6%), enquanto o GABA resultou em 284,24 mg g⁻¹ MS (14,8%), e a aplicação combinada apresentou 282,30 mg g⁻¹ MS (14,0%) (Figura 9B).

Os incrementos nos teores de proteínas solúveis com a aplicação de bioestimulantes sob elevada salinidade indicam maior estabilidade do metabolismo proteico e possível indução de proteínas associadas à tolerância ao estresse. A manutenção do conteúdo proteico sob salinidade é um importante indicador de tolerância, refletindo menor degradação proteica e maior capacidade de síntese de compostos funcionais (Heidarzadeh, 2025).

Os teores de proteínas solúveis também apresentaram interação entre salinidade e bioestimulantes (Figura 9C). Em CEa 0,5 dS m⁻¹, plantas sem bioestimulantes apresentaram teor médio de proteínas de 0,96 mg g⁻¹ MS. A aplicação de GABA elevou esse valor para 1,13 mg g⁻¹ MS, correspondendo a incremento de 17,2%, enquanto a metionina apresentou valor semelhante (1,03 mg g⁻¹ MS). O tratamento Met + GABA reduziu o teor proteico para 0,94 mg g⁻¹ MS (2,5%) (Figura 9C). Sob CEa 2,5 dS m⁻¹, o teor médio de proteínas no controle foi de 0,93 mg g⁻¹ MS. A aplicação de metionina elevou esse valor para 1,02 mg g⁻¹ MS, incremento de 9,7%, enquanto o GABA manteve valor semelhante. O tratamento Met + GABA apresentou 0,95 mg g⁻¹ MS (Figura 9C). Na CEa 4,5 dS m⁻¹, plantas sem bioestimulantes apresentaram teor de proteínas de 0,82 mg g⁻¹ MS. A aplicação de metionina promoveu incremento para 0,96 mg g⁻¹ MS, correspondente a aumento de 17,1%, enquanto Met + GABA elevou o teor para 0,99 mg g⁻¹ MS, incremento de 20,7% (Figura 9C).

Os incrementos nos teores de proteínas solúveis com a aplicação de bioestimulantes sob elevada salinidade indicam maior estabilidade do metabolismo proteico e possível indução de proteínas associadas à tolerância ao estresse. A manutenção do conteúdo proteico sob salinidade é

um importante indicador de tolerância, refletindo menor degradação proteica e maior capacidade de síntese de compostos funcionais (Athar *et al.*, 2022).

Para a prolina, observou-se interação significativa entre os fatores avaliados (Figura 9D). Na CEa 0,5 dS m⁻¹, plantas sem bioestimulantes apresentaram teor médio de prolina de 168,66 µmol g⁻¹ MS. A aplicação de GABA reduziu esse valor para 94,32 µmol g⁻¹ MS, correspondendo à redução de 44,1%, enquanto a metionina resultou em 117,84 µmol g⁻¹ MS (30,1%). O tratamento Met + GABA apresentou 71,88 µmol g⁻¹ MS, representando redução de 57,4% (Figura 9D). Sob CEa 2,5 dS m⁻¹, o teor médio de prolina no controle foi de 404,93 µmol g⁻¹ MS. A aplicação de GABA reduziu esse valor para 376,55 µmol g⁻¹ MS, correspondente à redução de 7,0%, enquanto a metionina apresentou 419,53 µmol g⁻¹ (Figura 9D). O tratamento Met + GABA reduziu a prolina para 349,24 µmol g⁻¹ MS, representando redução de 13,8% (Figura 9D). Em CEa 4,5 dS m⁻¹, plantas sem bioestimulantes apresentaram prolina média de 516,58 µmol g⁻¹ MS. A aplicação de GABA reduziu esse valor para 388,17 µmol g⁻¹ MS (24,9%), enquanto a metionina resultou em 444,67 µmol g⁻¹ MS (13,9%). O tratamento Met + GABA apresentou 495,23 µmol g⁻¹ MS, correspondente à redução de 4,1% (Figura 9D).

A elevada acumulação de prolina em plantas não tratadas sob estresse salino reflete a intensidade do estresse imposto. A redução consistente dos teores de prolina nos tratamentos com metionina e GABA indica menor necessidade de ativação desse mecanismo de resposta ao estresse, sugerindo que os bioestimulantes reduziram efetivamente os efeitos deletérios da salinidade. Esse comportamento está de acordo com estudos que apontam a prolina como marcador bioquímico de estresse, e não necessariamente de tolerância (Jarin *et al.*, 2024).

Houve interação significativa entre a salinidade da água de irrigação e a aplicação de bioestimulantes para o teor de sódio (Na⁺) nas folhas de rúcula (Figura 10A). Na CEa 0,5 dS m⁻¹, plantas sem aplicação de bioestimulantes apresentaram teor médio de Na⁺ de 1,82 g kg⁻¹ MS. A aplicação de metionina reduziu esse valor para 1,24 g kg⁻¹ MS, correspondendo à redução de 31,6%, enquanto o GABA promoveu incremento, atingindo 2,33 g kg⁻¹ MS (28,2%) (Figura 10A). O tratamento Met + GABA apresentou teor de 0,6680 g kg⁻¹ MS, correspondente à redução de 63,3% em relação ao controle (Figura 10A). Sob CEa 2,5 dS m⁻¹, o teor médio de Na⁺ no tratamento sem bioestimulantes foi de 6,25 g kg⁻¹ MS. A aplicação de metionina reduziu esse valor para 4,36 g kg⁻¹ MS (30,2%), enquanto o GABA elevou em 7,32 g kg⁻¹ MS (17,1%). O tratamento Met + GABA promoveu a maior redução, atingindo 6,17 g kg⁻¹ MS, correspondente à diminuição de

1,3% (Figura 10A). Na CEa 4,5 dS m⁻¹, plantas sem bioestimulantes apresentaram teor médio de Na⁺ de 10,44 g kg⁻¹ MS. A aplicação de metionina elevou esse valor para 10,52 g kg⁻¹ MS (0,8%), enquanto o GABA promoveu redução para 8,96 g kg⁻¹ MS (14,2%). O tratamento Met + GABA apresentou o mesmo teor de Na⁺ em relação as plantas sem bioestimulantes (Figura 10A).

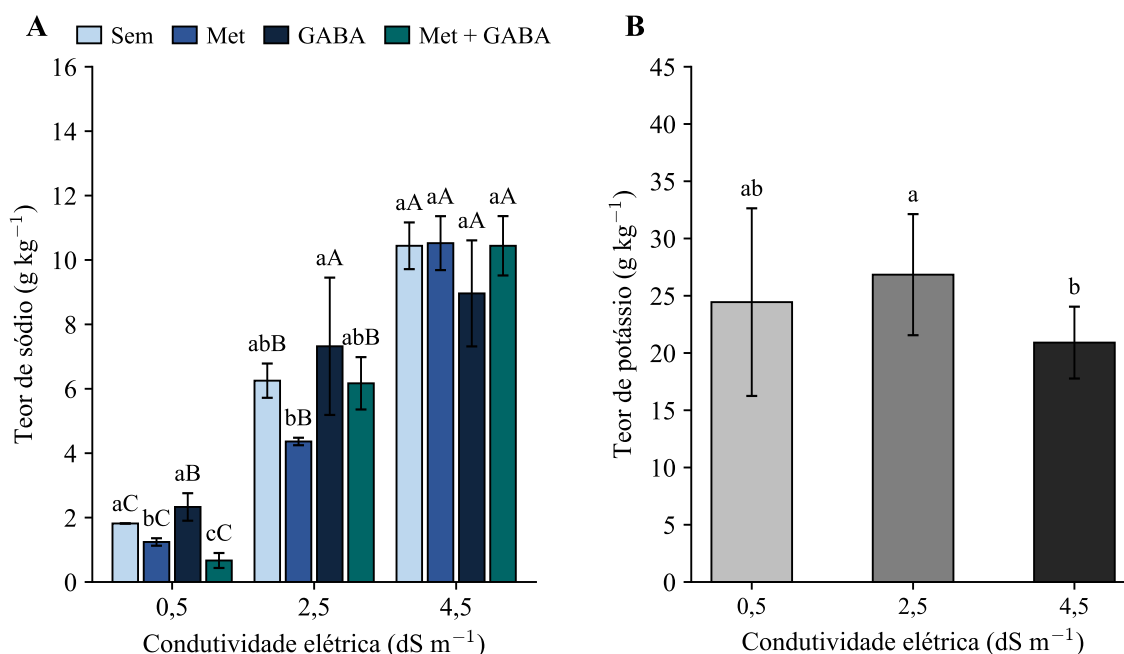


Figura 10 - Teor de sódio (A) e teor de potássio (B) em plantas de rúcula de folha larga sob níveis de condutividade elétrica da água de irrigação (CEa: 0,5, 2,5 e 4,5 dS m⁻¹) e concentrações de metionina (0,3 mM), GABA (0,5 mM) e a combinação Met + GABA (0,3 + 0,5 mM). Fonte: O autor (2026). Médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas não diferem para os bioestimulantes dentro de cada nível salino, e médias seguidas das mesmas letras maiúsculas não diferem para a salinidade da água de irrigação de acordo com ao teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

A redução do teor de sódio nas folhas de rúcula com a aplicação de metionina e GABA, especialmente de forma combinada, no tratamento controle, indica maior capacidade das plantas em restringir a absorção e/ou o transporte de Na⁺ para a parte aérea. Esse mecanismo é fundamental para a tolerância ao estresse salino, uma vez que o acúmulo excessivo de Na⁺ compromete processos metabólicos essenciais, como a fotossíntese e a integridade das membranas celulares (Tabssum *et al.*, 2019).

O GABA pode atuar modulando o transporte iônico e o balanço eletroquímico celular, ao passo que a metionina contribui para a manutenção da integridade das membranas e para o

funcionamento adequado de transportadores, favorecendo a exclusão de Na^+ sob condições salinas (Wang *et al.*, 2025).

Para o teor de potássio (K^+), não houve interação significativa entre a salinidade da água e os bioestimulantes, sendo observado apenas efeito isolado da salinidade (Figura 10B). O teor médio de K^+ foi reduzido progressivamente com o aumento da salinidade da água de irrigação, passando de $36,42 \text{ g kg}^{-1}$ MS em CEa $0,5 \text{ dS m}^{-1}$ para $29,18 \text{ g kg}^{-1}$ MS em CEa $4,5 \text{ dS m}^{-1}$, correspondendo a uma redução de 19,9%, independentemente da aplicação de metionina e GABA (Figura 10B).

A ausência de efeito dos bioestimulantes sobre o teor de K^+ indica que, embora metionina e GABA tenham sido eficientes na redução do acúmulo de Na^+ , esses compostos não foram suficientes para evitar a diminuição da absorção de K^+ imposta pela elevada salinidade da solução do solo. A redução do teor de potássio com o aumento da salinidade, independentemente da aplicação de bioestimulantes, reflete a competição iônica entre Na^+ e K^+ nos sítios de absorção radicular. Esse antagonismo é amplamente documentado na literatura e constitui um dos principais efeitos deletérios da salinidade sobre o metabolismo vegetal, uma vez que o K^+ desempenha papel central na ativação enzimática, regulação osmótica e controle estomático (Van Zelm; Zhang; Testerink, 2020).

A Análise de Componentes Principais (ACP) realizada (Figura 11) foi empregada para sintetizar as respostas fisiológicas, bioquímicas e de crescimento das plantas de rúcula submetidas a diferentes níveis de salinidade da água de irrigação e à aplicação exógena de metionina, GABA e suas combinações (Figura 11). Os dois componentes principais, PC1 e PC2, explicaram conjuntamente 45,4% da variância total dos dados, com PC1 representando 30,7%, e PC2, 14,7% da variância explicada (Figura 11). Essa parcela de variância é consistente com outros estudos fisiológicos em condições de estresses abióticos, nos quais os dois eixos da ACP costumam capturar as tendências dominantes de resposta (Cai; Gao, 2020; Mubushar *et al.*, 2022).

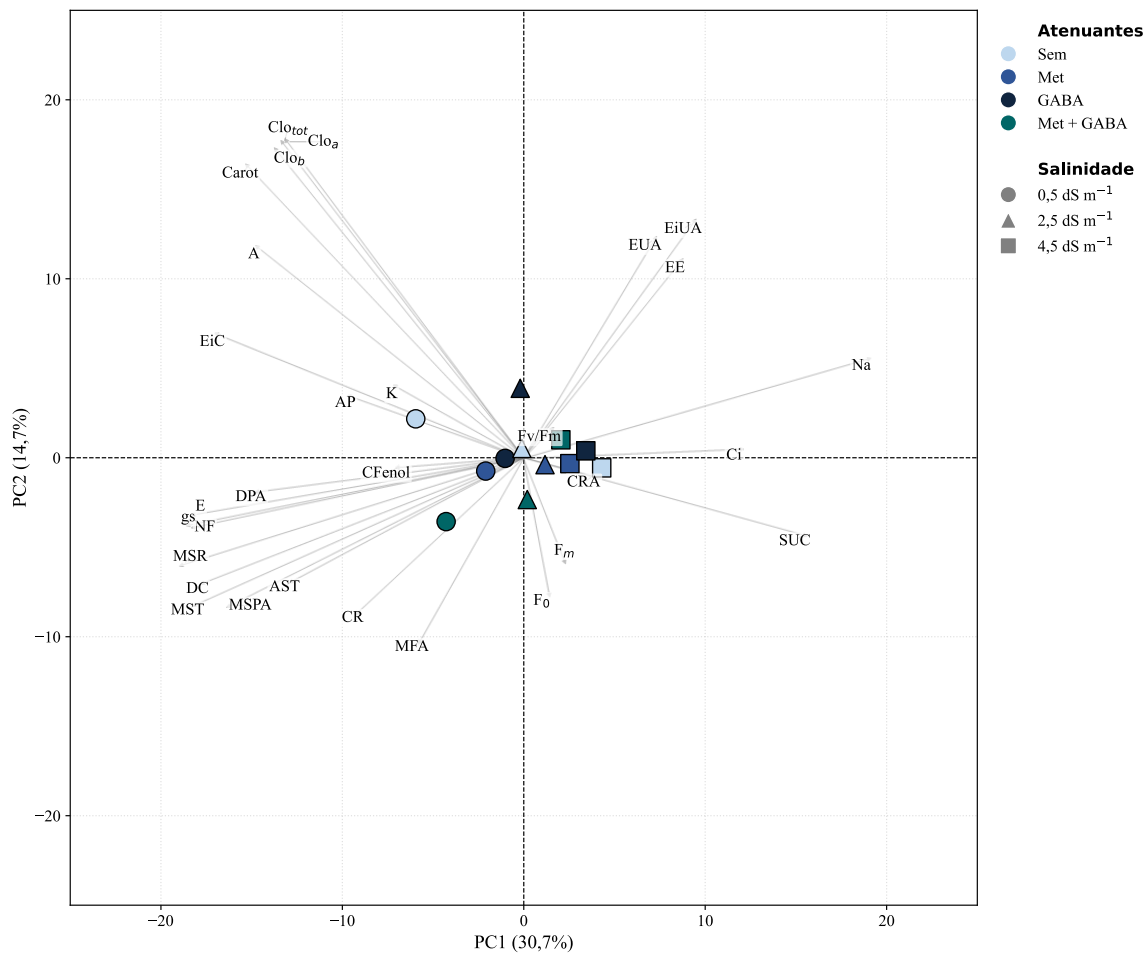


Figura 11 - Análise de Componentes Principais (ACP) entre os tratamentos e as variáveis avaliadas. Fonte: O autor (2026).

O primeiro componente (PC1) discriminou fortemente as variáveis relacionadas ao desempenho fisiológico e produtivo daquelas associadas ao estresse salino (Figura 11). As variáveis posicionadas no lado negativo de PC1, incluindo a taxa de assimilação líquida de CO₂ (A), a condutância estomática (gs), a transpiração (E), as clorofilas a, b e total, os carotenoides, a massa seca da parte aérea (MSPA), a massa seca da raiz (MSR) e a massa seca total (MST) estão associadas a respostas fisiológicas positivas, como eficiência fotossintética preservada e crescimento vegetativo favorável (Figura 11). Esse agrupamento indica que plantas com menor impacto do estresse salino mantiveram maior atividade fotossintética, maior conteúdo de pigmentos e maior investimento em biomassa (Figura 11).

Esse padrão contrasta com o agrupamento de variáveis no lado positivo de PC1, no qual se destacam o teor foliar de sódio (Na⁺), a concentração interna de CO₂ (Ci), a suculência (SUC), o

conteúdo relativo de água (CRA) e a razão de fluorescência F_v/F_m (Figura 11). O posicionamento conjunto dessas variáveis sugere que a intensificação dos efeitos deletérios do estresse está ligada ao acúmulo iônico (particularmente de Na^+) e a perturbações no balanço hídrico e fotoquímico. A associação entre acúmulo de Na^+ e redução de parâmetros de crescimento e fotossíntese está alinhada a achados recentes que relatam o impacto negativo da toxicidade iônica sobre a integridade dos tilacoides, eficiência do fotossistema II e produtividade em hortaliças sob salinidade (Lu *et al.*, 2023; Yan; Chong; Zhao, 2022).

Nesse sentido, o posicionamento dos tratamentos sob alta salinidade ($4,5 \text{ dS m}^{-1}$) no lado positivo de PC1 reflete um estado fisiológico caracterizado por maior acúmulo de Na^+ e sensibilização ao estresse, corroborando a literatura de que o aumento dos sais na solução do solo reduz a disponibilidade hídrica efetiva e impõe cargas iônicas que prejudicam processos metabólicos centrais (Lindberg; Premkumar, 2023).

O segundo componente (PC2) explicou 14,7% da variância e destacou variáveis relacionadas ao estado hídrico e à eficiência fisiológica (Figura 11). Nesse componente, variáveis como eficiência instantânea do uso da água (EUA), eficiência intrínseca do uso da água (EiUA) e o extravasamento de eletrólitos (EE) mostraram cargas positivas, sugerindo que parte da variação não capturada por PC1 é explicada por estratégias de ajuste osmótico e pela manutenção da integridade celular (Figura 11).

A presença de variáveis de fluorescência como F_0 e F_m no lado negativo de PC2 evidencia diferenças em termos de eficiência fotoquímica e capacidade de dissipação energética. Estudos recentes têm destacado a importância do uso integrado de parâmetros de fluorescência para compreender a fotoaclimação em plantas submetidas à salinidade e a outros estresses, demonstrando que ajustes na dissipação não fotoquímica e na eficiência quântica são cruciais para definir a tolerância (RANA *et al.*, 2021; WANG *et al.*, 2022).

A distribuição dos tratamentos no plano bidimensional da ACP reflete de forma coerente o efeito conjunto da salinidade e das aplicações de metionina e GABA (Figura 11). Plantas submetidas à menor salinidade ($0,5 \text{ dS m}^{-1}$), independentemente dos bioestimulantes, posicionaram-se no quadrante associado a variáveis de desempenho positivo, com maior assimilação de CO_2 , maior conteúdo de pigmentos e maior produção de biomassa (Figura 11). Isso indica que, sob condições quase ideais, o estresse salino é insuficiente para provocar deslocamento fisiológico relevante.

Em contraste, no tratamento sob $4,5 \text{ dS m}^{-1}$ sem bioestimulante, as plantas deslocaram-se para o quadrante dominado por Na^+ e outras variáveis que representam estresse, corroborando que a salinidade severa impõe forte restrição fisiológica (Figura 11). Esse comportamento foi claramente mitigado nos tratamentos com GABA e Met + GABA, que se posicionaram em uma posição intermediária no eixo PC1 (Figura 11). Esse deslocamento é indicativo de que tais bioestimulantes promoveram redução da magnitude dos efeitos deletérios da salinidade, deslocando as respostas fisiológicas das plantas em direção a um perfil mais semelhante ao observado sob baixa salinidade (Figura 11).

Esse padrão de mitigação também é consistente com estudos recentes que demonstraram que moléculas reguladoras como GABA e aminoácidos podem modular respostas fisiológicas integradas em situações de estresse abiótico, preservando aspectos do metabolismo central como trocas gasosas, balanço hídrico e integridade das membranas celulares (Dabravolski; Isayenkov, 2023b; Wang *et al.*, 2025).

A ACP evidencia que a salinidade atua sobre múltiplos processos fisiológicos, transmitindo efeitos dominantes tanto sobre o crescimento vegetativo quanto sobre parâmetros fotoquímicos e metabólicos (Figura 11). O deslocamento coordenado das variáveis de desempenho para um lado do gráfico confirma que a salinidade altera simultaneamente a eficiência fotossintética, o balanço hídrico e o equilíbrio iônico, resultando em uma diminuição integrada da capacidade funcional da planta (Figura 11).

Ao mesmo tempo, a posição intermediária dos tratamentos atenuados sugere que a aplicação de metionina e GABA, especialmente em combinação, promove reorganização simultânea de mecanismos fisiológicos de ajuste osmótico, manutenção de fotossíntese e mitigação da toxicidade iônica, o que tem sido reportado na literatura como um dos caminhos mais eficazes para aumentar a tolerância de plantas ao estresse de salinidade (Peña Calzada *et al.*, 2022; Chang *et al.*, 2025).

A matriz de correlação de Pearson revelou associações fortes, estatisticamente consistentes e fisiologicamente coerentes entre as variáveis avaliadas (Figura 12). As variáveis de crescimento e biomassa demonstraram correlações positivas fortes entre si: a massa seca total (MST) se correlacionou muito positivamente com a massa seca da parte aérea (MSPA; $r = 0,98$) e com a massa seca da raiz (MSR; $r = 0,81$) (Figura 12). Esse padrão reflete que a redução da biomassa ocorre como um fenômeno integrado, envolvendo tanto a parte aérea quanto o sistema radicular.

Estudos recentes destacam que a coordenação entre crescimento radicular e da parte aérea é um indicador robusto de tolerância ao estresse salino em hortaliças folhosas (Pandit *et al.*, 2024; Aydın, 2025).

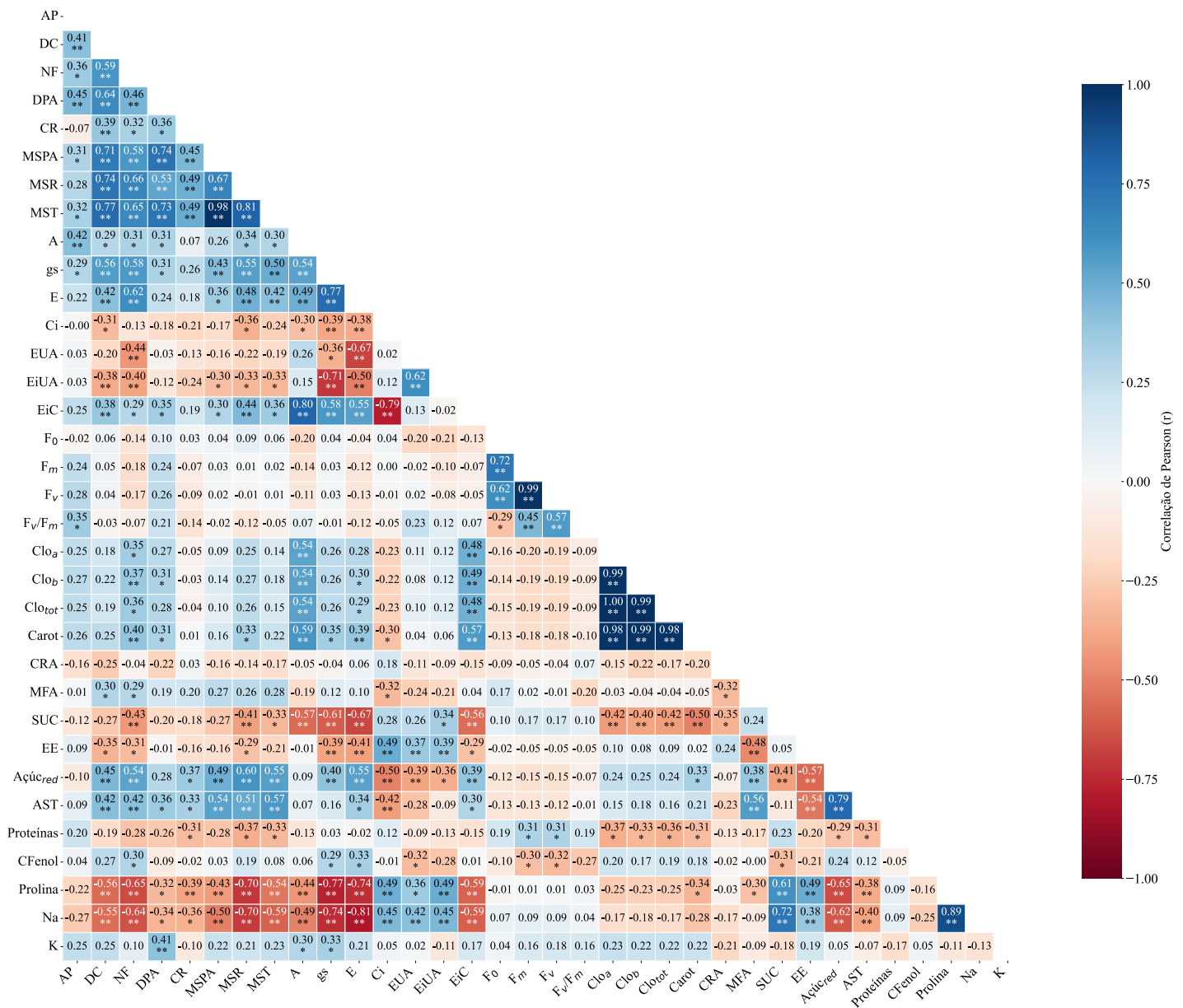


Figura 12 - Análise da correlação de Pearson entre as variáveis avaliadas. Fonte: O autor (2025).

A correlação positiva entre as variáveis de biomassa e os parâmetros fisiológicos (como taxa de assimilação de CO₂, A; condutância estomática, gs; e transpiração, E) sugere que plantas

com maior desempenho fotossintético acumulam mais biomassa, reforçando o papel central da fotossíntese no crescimento vegetativo sob estresse (Ors *et al.*, 2021; Kokebie *et al.*, 2024).

A correlação positiva entre as variáveis de biomassa e os parâmetros fisiológicos (como taxa de assimilação de CO₂, A; condutância estomática, gs; e transpiração, E) sugere que plantas com maior desempenho fotossintético acumulam mais biomassa, reforçando o papel central da fotossíntese no crescimento vegetativo sob estresse salino (Adhikari *et al.*, 2023, 2025).

As eficiências no uso da água mostraram correlações complexas com outras variáveis. A eficiência intrínseca do uso da água (EiUA) apresentou correlação negativa forte com A ($r = -0,71$) e E ($r = -0,50$) (Figura 12), sugerindo que sob salinidade plantas que mantêm taxas mais elevadas de assimilação em relação à perda de água tendem a apresentar maior eficiência intrínseca. Essa relação pode refletir um ajuste fisiológico ao ambiente salino, onde a manutenção da assimilação, mesmo com menor transpiração, é vantajosa para a sobrevivência e o crescimento (Navegantes *et al.*, 2024; Jácome Cavalcante *et al.*, 2025).

A eficiência de carboxilação (EiC) apresentou correlações positivas com A ($r = 0,80$), gs ($r = 0,58$) e E ($r = 0,55$), indicando que a eficiência bioquímica da fotossíntese está diretamente associada às trocas gasosas e ao desempenho fotossintético (Figura 12). Isso está de acordo com estudos que demonstram que a capacidade de manter a eficiência do fotossistema II e o balanço redox é determinante para a tolerância à salinidade (Malekzadeh; Roosta; Kalaji, 2023; Roosta *et al.*, 2025).

As correlações quase perfeitas entre os pigmentos (Chl a $\times$ Chl b $r = 0,99$; Chl total) confirmam que a manutenção dos pigmentos é um indicador consistente da integridade do aparato fotossintético (Figura 12). A presença de relações positivas entre pigmentos e variáveis de eficiência fisiológica reforça que a preservação dos componentes fotoquímicos é crucial para reduzir os efeitos adversos da salinidade (Mendonça *et al.*, 2023; Sahito; Benavides-Mendoza; Cota-Ruiz, 2024).

As variáveis relacionadas ao ajuste osmótico, como açúcares redutores (Açúcredo) e açúcares solúveis totais (AST), apresentaram correlações positivas com variáveis de crescimento e fotossíntese, sugerindo que o acúmulo de osmólitos contribui para a manutenção do desempenho metabólico sob estresse. Esse comportamento tem sido amplamente documentado em cultivos sob salinidade, onde açúcares solúveis atuam como osmoprotetores e estabilizadores de proteínas e membranas (Mohamed *et al.*, 2025).

A prolina apresentou correlações positivas com Na^+ ($r = 0,89$) e SUC ($r = 0,72$), e correlações negativas com parâmetros de crescimento e fotossíntese (Figura 12), caracterizando-se como marcador de intensidade de estresse mais do que como indicador direto de tolerância. Isso corrobora evidências recentes de que altos acúmulos de prolina estão associados à resposta ao dano celular em vez de, isoladamente, refletir mecanismos de adaptação vantajosos (Renzetti; Bertolini; Trovato, 2024; Santos *et al.*, 2024).

Uma das correlações mais relevantes detectadas foi a associação negativa entre o teor de Na^+ e variáveis de desempenho como A ($r = -0,74$), gs ($r = -0,81$), MST ($r = -0,70$) e EiC ($r = -0,59$) (Figura 12). Isso confere forte evidência de que o acúmulo de Na^+ é um dos principais fatores limitantes da performance fisiológica sob salinidade, corroborando a literatura que descreve o impacto negativo da toxicidade iônica sobre a fotossíntese, homeostase hídrica e integridade das membranas celulares (El Moukhtari *et al.*, 2020; Santos *et al.*, 2024).

Em contraste, o potássio (K) apresentou correlações mais fracas com a maioria dos parâmetros, sugerindo que a homeostase do K^+ foi menos determinante na variação global observada ou que variações de K^+ foram dependentes de outros mecanismos de balanço iônico influenciados por Na^+ (Figura 12).

A matriz de correlação de Pearson demonstrou que o acúmulo de Na^+ é um determinante universalmente negativo para crescimento, fotossíntese e eficiência bioquímica (Figura 12). A cooperação entre trocas gasosas, pigmentos e eficiência de carboxilação sustenta o desempenho fisiológico mesmo sob estresse (Figura 12). O acúmulo de osmólitos, como açúcares solúveis e prolina, representa respostas de ajuste osmótico e estresse, mais do que indicadores de tolerância por si só (Figura 12). A homeostase hídrica e a eficiência no uso da água são elementos-chave para mitigar as restrições difusivas e bioquímicas impostas pelo ambiente salino (Figura 12).

Esses resultados confirmam que o estresse salino atua de maneira integrada e multifatorial, e que a aplicação de bioestimulantes como GABA e metionina interage com esse sistema, modulando parte das respostas fisiológicas, bioquímicas e de crescimento (Suleiman *et al.*, 2023).

5 CONCLUSÕES

Os resultados deste estudo demonstram que a salinidade compromete severamente o desempenho fisiológico e o crescimento de *Eruca sativa* Mill., impondo limitações fotossintéticas predominantemente não estomáticas, reduzindo a eficiência fotoquímica do fotossistema II, promovendo desequilíbrio iônico, comprometendo a integridade das membranas celulares e prejudicando o crescimento vegetal.

A aplicação exógena de GABA e metionina modulou de forma significativa essas respostas, com efeitos dependentes da intensidade do estresse. Sob elevada salinidade (4,5 dS m⁻¹), ambos os compostos atenuaram os danos fisiológicos, porém a aplicação combinada mostrou desempenho superior, promovendo maior manutenção da assimilação de carbono, melhor eficiência do uso da água, preservação dos pigmentos fotossintéticos, maior estabilidade fotoquímica e melhor equilíbrio Na⁺/K⁺. Esses ajustes refletiram-se diretamente no maior acúmulo de biomassa sob estresse salino severo.

Os resultados indicam que a ação combinada de GABA e metionina favorece a manutenção da funcionalidade fotossintética e da estabilidade celular sob estresse osmótico e iônico, sugerindo interação complementar entre os compostos na modulação do metabolismo vegetal em condições salinas.

Assim, conclui-se que a aplicação conjunta de GABA e metionina constitui estratégia fisiologicamente eficiente para mitigar os efeitos da salinidade em rúcula, com potencial aplicação em sistemas agrícolas irrigados com águas salinas, especialmente em regiões semiáridas.

REFERÊNCIAS

- ADHIKARI, B. *et al.* Impact of salt stress on physiology, leaf mass, and nutrient accumulation in romaine lettuce. **Photosynthetica**, [s. l.], v. 61, n. 3, p. 342–353, 2023. Disponível em: <http://ps.ueb.cas.cz/doi/10.32615/ps.2023.027.html>.
- ADHIKARI, B. *et al.* Morpho-physiological, leaf hyperspectral, and nutritional responses of lettuce to salt stress. **Plant Physiology Reports**, [s. l.], v. 30, n. 4, p. 721–735, 2025. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s40502-025-00885-w>. Acesso em: 24 fev. 2026.
- AHMAD, M. H. *et al.* Effect of exogenously applied amino acids on photosynthetic pigments, metabolites and enzymatic antioxidants in Zea mays L. subjected to salt stress. **Scientific Reports**, [s. l.], v. 15, n. 1, p. 39025, 2025. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-025-25724-8>. Acesso em: 30 jan. 2026.
- AHMAD, A.; BLASCO, B.; MARTOS, V. Combating Salinity Through Natural Plant Extracts Based Biostimulants: A Review. **Frontiers in Plant Science**, [s. l.], v. 13, p. 862034, 2022. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2022.862034/full>. Acesso em: 30 jan. 2026.
- AHMAD, S.; FARIDUDDIN, Q. GABA mitigates NaCl toxicity by enhancing photosynthesis, chloroplast structure, and redox balance in salt-tolerant and sensitive tomato varieties. **Environmental Science and Pollution Research**, [s. l.], v. 32, n. 15, p. 9676–9696, 2025. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s11356-025-36263-0>.
- ALGHAMDI, S. DROUGHT AND SALINITY EFFECTS ON PLANT GROWTH: A COMPREHENSIVE REVIEW. **SABRAO Journal of Breeding and Genetics**, [s. l.], v. 56, n. 6, p. 2231–2340, 2024. Disponível em: <https://sabraojournal.org/drought-salinity-effects-plant-growth-comprehensive-review/>.
- ALJUAID, B. S.; ASHOUR, H. Exogenous γ -Aminobutyric Acid (GABA) Application Mitigates Salinity Stress in Maize Plants. **Life**, [s. l.], v. 12, n. 11, p. 1860, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-1729/12/11/1860>.
- ALMAS, H. I. *et al.* Exogenous Application of Methionine and Phenylalanine Confers Salinity Tolerance in Tomato by Concerted Regulation of Metabolites and Antioxidants. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, [s. l.], v. 21, n. 4, p. 3051–3064, 2021. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s42729-021-00588-9>. Acesso em: 18 jan. 2026.
- ALNUSAIRE, T. S. Application of γ -aminobutyric acid alleviates salinity-mediated growth decline and oxidative damage by increasing proline and antioxidant functioning in olive (*Olea europaea* L.). **Frontiers in Plant Science**, [s. l.], v. 16, p. 1737858, 2026. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2025.1737858/full>. Acesso em: 5 fev. 2026.
- ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, [s. l.], v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013. Disponível em: http://www.schweizerbart.de/papers/metz/detail/22/82078/Koppen_s_climate_classification_map_for_Brazil?f=crossref.
- AMANI, M. *et al.* Foliar spraying of salicylic acid and melatonin enhances the nutritional value of Arugula (*Eruca vesicaria* subsp. *sativa* mill.). **BMC Plant Biology**, [s. l.], v. 25, n. 1, p. 1312, 2025. Disponível em: <https://bmcpantbiol.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12870-025-07375-z>.

- ARIF, Y. *et al.* Salinity induced physiological and biochemical changes in plants: An omic approach towards salt stress tolerance. **Plant Physiology and Biochemistry**, [s. l.], v. 156, p. 64–77, 2020. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0981942820304241>. Acesso em: 2 fev. 2026.
- ATHAR, H.-R. *et al.* Salt stress proteins in plants: An overview. **Frontiers in Plant Science**, [s. l.], v. 13, p. 999058, 2022. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2022.999058/full>.
- ATTA, K. *et al.* Impacts of salinity stress on crop plants: improving salt tolerance through genetic and molecular dissection. **Frontiers in Plant Science**, [s. l.], v. 14, p. 1241736, 2023. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2023.1241736/full>.
- AYDIN, A. Evaluation of Salt Stress Tolerance in Lettuce (*Lactuca sativa* L.) Cultivars Under Hydroponic Conditions. **Black Sea Journal of Engineering and Science**, [s. l.], v. 8, n. 5, p. 1339–1348, 2025. Disponível em: <https://dergipark.org.tr/en/doi/10.34248/bsengineering.1663621>.
- BADR, A. *et al.* Ameliorative impacts of gamma-aminobutyric acid (GABA) on seedling growth, physiological biomarkers, and gene expression in eight wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars under salt stress. **BMC Plant Biology**, [s. l.], v. 24, n. 1, p. 605, 2024. Disponível em: <https://bmcpantbiol.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12870-024-05264-5>.
- BALASUBRAMANIAM, T. *et al.* Plants' Response Mechanisms to Salinity Stress. **Plants**, [s. l.], v. 12, n. 12, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2223-7747/12/12/2253>. Acesso em: 23 jan. 2026.
- BARRS, H.; WEATHERLEY, P. A Re-Examination of the Relative Turgidity Technique for Estimating Water Deficits in Leaves. **Australian Journal of Biological Sciences**, [s. l.], v. 15, n. 3, p. 413–428, 1962. Disponível em: <https://connectsci.au/bi/article/15/3/413/184262/A-Re-Examination-of-the-Relative-Turgidity>. Acesso em: 3 fev. 2026.
- BATES, L. S.; WALDREN, R. P.; TEARE, I. D. Rapid determination of free proline for water-stress studies. **Plant and Soil**, [s. l.], v. 39, n. 1, p. 205–207, 1973. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/BF00018060>.
- BOUCHÉ, N.; FROMM, H. GABA in plants: just a metabolite?. **Trends in Plant Science**, [s. l.], v. 9, n. 3, p. 110–115, 2004. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S136013850400024X>.
- BOUSSORA, F. *et al.* Mineral accumulation, relative water content and gas exchange are the main physiological regulating mechanisms to cope with salt stress in barley. **Scientific Reports**, [s. l.], v. 14, n. 1, p. 14931, 2024. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-024-65967-5>.
- BRADFORD, M. M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. **Analytical Biochemistry**, [s. l.], v. 72, n. 1–2, p. 248–254, 1976. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0003269776905273>.
- BULGARI, R.; FRANZONI, G.; FERRANTE, A. Biostimulants Application in Horticultural Crops under Abiotic Stress Conditions. **Agronomy**, [s. l.], v. 9, n. 6, p. 306, 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4395/9/6/306>.
- CAFERRI, R. *et al.* Assessing photoprotective functions of carotenoids in photosynthetic systems of plants and green algae. In: **Methods in enzymology**. [S. l.]: Elsevier, 2022. v. 674, p. 53–84. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0076687922001653>.

CAI, Z.-Q.; GAO, Q. Comparative physiological and biochemical mechanisms of salt tolerance in five contrasting highland quinoa cultivars. **BMC Plant Biology**, [s. l.], v. 20, n. 1, p. 70, 2020. Disponível em: <https://bmcpantbiol.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12870-020-2279-8>.

CASTRO, F. C.; SANTOS, A. M. D. SALINITY OF THE SOIL AND THE RISK OF DESERTIFICATION IN THE SEMIARID REGION. **Mercator**, Fortaleza, v. 19, n. 1, p. 1–13, 2020. Disponível em: <http://www.mercator.ufc.br/mercator/article/view/2269>.

CHANG, K. W. *et al.* Recent advances in plant stress analysis using chlorophyll a fluorescence. **Photosynthetica**, [s. l.], v. 63, n. 4, p. 359–373, 2025. Disponível em: <http://ps.ueb.cas.cz/doi/10.32615/ps.2025.037.html>.

CHELE, K. H. *et al.* Soil Salinity, a Serious Environmental Issue and Plant Responses: A Metabolomics Perspective. **Metabolites**, [s. l.], v. 11, n. 11, p. 724, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2218-1989/11/11/724>. Acesso em: 23 fev. 2026.

CIALLI, S. *et al.* Physiological and hormonal responses underlying salinity tolerance in wild tomatoes: Insights for cultivated varieties. **Environmental and Experimental Botany**, [s. l.], v. 241, p. 106296, 2026. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0098847225002138>. Acesso em: 5 fev. 2026.

CIRIELLO, M. *et al.* Differential Effects of Non-Microbial Biostimulants on Secondary Metabolites and Nitrate Content in Organic Arugula Leaves. **Foods**, [s. l.], v. 14, n. 14, p. 2489, 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2304-8158/14/14/2489>.

CORTI, E. *et al.* Rapamycin-Reactivated Lipid Catabolism in *Eruca sativa* Mill. Exposed to Salt Stress. **Cells**, [s. l.], v. 14, n. 14, p. 1083, 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4409/14/14/1083>.

COSTA, L. P. *et al.* Salt stress and calcium nitrate in arugula in soilless cultivation using substrate. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s. l.], v. 29, p. e285670, 2024. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/8pQVqZccSZvRYW7mCscXJSz/?lang=en>. Acesso em: 27 abr. 2025.

DABRAVOLSKI, S. A.; ISAYENKOV, S. V. The Role of the γ -Aminobutyric Acid (GABA) in Plant Salt Stress Tolerance. **Horticulturae**, [s. l.], v. 9, n. 2, p. 230, 2023a. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2311-7524/9/2/230>.

DABRAVOLSKI, S. A.; ISAYENKOV, S. V. The Role of the γ -Aminobutyric Acid (GABA) in Plant Salt Stress Tolerance. **Horticulturae**, [s. l.], v. 9, n. 2, p. 230, 2023b. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2311-7524/9/2/230>.

DE OLIVEIRA MANGAROTTI, D. P. *et al.* Water requirements and crop coefficients of arugula grown in a protected environment. **Idesia (Arica)**, [s. l.], v. 37, n. 2, p. 75–79, 2019. Disponível em: http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-34292019000200075&lng=en&nrm=iso&tlng=en. Acesso em: 23 fev. 2026.

DESOKY, E.-S. M. *et al.* Stimulating antioxidant defenses, antioxidant gene expression, and salt tolerance in *Pisum sativum* seedling by pretreatment using licorice root extract (LRE) as an organic biostimulant. **Plant Physiology and Biochemistry**, [s. l.], v. 142, p. 292–302, 2019. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0981942819302992>. Acesso em: 30 jan. 2026.

DUBEY, R.; MISRA, S. Biostimulants: an eco-friendly regulator of plant stress tolerance and sustainable solution to future agriculture. **Proceedings of the Indian National Science Academy**, [s. l.], v. 91, n. 1, p. 60–67, 2025. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s43538-024-00328-4>.

EL MOUKHTARI, A. *et al.* How Does Proline Treatment Promote Salt Stress Tolerance During Crop Plant Development?. **Frontiers in Plant Science**, [s. l.], v. 11, p. 1127, 2020. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fpls.2020.01127/full>.

FATHI, A. *et al.* Impact of Salt Stress on Plants: Innovative Mitigation Strategies for Stress Alleviating. **Egyptian Journal of Agronomy**, [s. l.], v. 47, n. 4, p. 1353–1370, 2025. Disponível em: https://agro.journals.ekb.eg/article_467394.html.

FENG, J. *et al.* γ -Aminobutyric Acid Alleviates Salinity-Induced Impairments in Rice Plants by Improving Photosynthesis and Upregulating Osmoprotectants and Antioxidants. **Agronomy**, [s. l.], v. 14, n. 11, p. 2524, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4395/14/11/2524>.

GAO, Z.-W. *et al.* SALINITY STRESS IN CULTIVATED PLANTS: TOXIC IMPACTS, TOLERANCE MECHANISMS AND MITIGATION STRATEGIES. **Applied Ecology and Environmental Research**, [s. l.], v. 23, n. 2, p. 1783–1814, 2025. Disponível em: https://www.aloki.hu/pdf/2302_17831814.pdf.

GARCÍA-VALENCIA, L. E. *et al.* Planting resilience: One-Carbon metabolism and stress responses. **Plant Physiology and Biochemistry**, [s. l.], v. 224, p. 109966, 2025. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0981942825004942>. Acesso em: 23 fev. 2026.

GARG, T. *et al.* Exogenous application of biostimulants for As stress tolerance in crop plants. In: **Biostimulants in alleviation of metal toxicity in plants**. [S. l.]: Elsevier, 2023. p. 243–266. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780323996006000050>. Acesso em: 30 jan. 2026.

GILL, S. S.; TUTEJA, N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, [s. l.], v. 48, n. 12, p. 909–930, 2010. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0981942810001798>.

GRUDA, N. S.; DONG, J.; LI, X. From Salinity to Nutrient-Rich Vegetables: Strategies for Quality Enhancement in Protected Cultivation. **Critical Reviews in Plant Sciences**, [s. l.], v. 43, n. 5, p. 327–347, 2024. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/07352689.2024.2351678>. Acesso em: 13 jan. 2026.

GUIDI, L.; LO PICCOLO, E.; LANDI, M. Chlorophyll Fluorescence, Photoinhibition and Abiotic Stress: Does it Make Any Difference the Fact to Be a C3 or C4 Species?. **Frontiers in Plant Science**, [s. l.], v. 10, p. 174, 2019. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fpls.2019.00174/full>.

GUO, H. *et al.* Growth, ionic homeostasis, and physiological responses of cotton under different salt and alkali stresses. **Scientific Reports**, [s. l.], v. 10, n. 1, p. 21844, 2020. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-020-79045-z>.

HAGHIGHI, M.; BARZEGAR SADEGHABAD, A.; ABOLGHASEMI, R. Effect of exogenous amino acids application on the biochemical, antioxidant, and nutritional value of some leafy cabbage cultivars. **Scientific Reports**, [s. l.], v. 12, n. 1, p. 17720, 2022. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-022-21273-6>. Acesso em: 2 fev. 2026.

HASANUZZAMAN, M. *et al.* (org.). **Plant Abiotic Stress Tolerance: Agronomic, Molecular and Biotechnological Approaches**. Cham: Springer International Publishing, 2019. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/978-3-030-06118-0>.

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**, [s. l.], v. 9, n. 8, p. 681, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3921/9/8/681>. Acesso em: 29 jan. 2026.

HAYAT, F. *et al.* γ Aminobutyric Acid (GABA): A Key Player in Alleviating Abiotic Stress Resistance in Horticultural Crops: Current Insights and Future Directions. **Horticulturae**, [s. l.], v. 9, n. 6, p. 647, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2311-7524/9/6/647>.

HEIDARZADEH, A. RETRACTED ARTICLE: Role of amino acids in plant growth, development, and stress responses: a comprehensive review. **Discover Plants**, [s. l.], v. 2, n. 1, p. 237, 2025. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s44372-025-00322-0>.

HENDERSON, B. C. R.; SANDERSON, J. M.; FOWLES, A. A review of the foliar application of individual amino acids as biostimulants in plants. **Discover Agriculture**, [s. l.], v. 3, n. 1, p. 69, 2025. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s44279-025-00222-7>. Acesso em: 2 fev. 2026.

ISAYENKOV, S. V.; MAATHUIS, F. J. M. Plant Salinity Stress: Many Unanswered Questions Remain. **Frontiers in Plant Science**, [s. l.], v. 10, p. 80, 2019. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fpls.2019.00080/full>.

JÁCOME CAVALCANTE, J. S. *et al.* Analysis on Salinity Tolerance of Lettuce Cultivars Under Saline Irrigation and Application of Organic Acids. **Plants**, [s. l.], v. 14, n. 2, p. 262, 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2223-7747/14/2/262>. Acesso em: 24 fev. 2026.

JARIN, A. *et al.* Glycine betaine in plant responses and tolerance to abiotic stresses. **Discover Agriculture**, [s. l.], v. 2, n. 1, p. 127, 2024. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s44279-024-00152-w>.

JIAO, Q.; HU, X. Recent Advances and Emerging Trends in Chlorophyll Fluorescence Parameter F_v/F_m . **Phyton**, [s. l.], v. 94, n. 9, p. 2615–2630, 2025. Disponível em: <https://www.techscience.com/phyton/v94n9/63931>.

JIN, X. *et al.* Exogenous GABA enhances muskmelon tolerance to salinity-alkalinity stress by regulating redox balance and chlorophyll biosynthesis. **BMC Plant Biology**, [s. l.], v. 19, n. 1, p. 48, 2019. Disponível em: <https://bmcpantbiol.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12870-019-1660-y>.

JIN, Y. *et al.* The Function of GABA in Plant Cell Growth, Development and Stress Response. **Phyton**, [s. l.], v. 92, n. 8, p. 2211–2225, 2023. Disponível em: <https://www.techscience.com/phyton/v92n8/53328>.

JOHNSON, R. *et al.* GABA-Mediated Salt Stress Tolerance Through Physiological and Molecular Mechanisms. In: SINGH, S.; TRIPATHI, D. K.; SINGH, V. P. (org.). **GABA in Plants**. 1. ed. [S. l.]: Wiley, 2025. p. 287–303. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9781394217786.ch16>. Acesso em: 23 fev. 2026.

KALHOR, M. S. *et al.* Title: Enhanced salt tolerance and photosynthetic performance: Implication of γ -amino butyric acid application in salt-exposed lettuce (*Lactuca sativa* L.) plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, [s. l.], v. 130, p. 157–172, 2018. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0981942818303036>. Acesso em: 2 fev. 2026.

KALORIZOU, H. *et al.* Coastal Almond-Leaved Pear (*Pyrus spinosa*) Seedlings' Responses to Saline Stress Alleviated by Formulated L-Methionine and Bacterial Exogenous Soil Application. **Horticulturae**, [s. l.], v. 10, n. 8, p. 849, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2311-7524/10/8/849>.

KHANNA, R. R. *et al.* GABA reverses salt-inhibited photosynthetic and growth responses through its influence on NO-mediated nitrogen-sulfur assimilation and antioxidant system in wheat. **Journal of Biotechnology**, [s. l.], v. 325, p. 73–82, 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168165620303163>.

KOKEBIE, D. *et al.* Morphological, physiological, and biochemical responses of three different soybean (*Glycine max* L.) varieties under salinity stress conditions. **Frontiers in Plant Science**, [s. l.], v. 15, p. 1440445, 2024. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2024.1440445/full>.

KUSVURAN, S.; ELLIALTIOGLU, S. S. Assessment of different organic matters on antioxidative enzyme activities and nutritional components under salt stress in salad rocket (*Eruca sativa*). **The Journal of Animal and Plant Sciences**, [s. l.], v. 31, n. 5, p. 1319–1328, 2021. Disponível em: <http://www.thejaps.org.pk/Volume/2021/31-05/13.php>. Acesso em: 30 jan. 2026.

LI, M. F. *et al.* Exogenous gamma-aminobutyric acid increases salt tolerance of wheat by improving photosynthesis and enhancing activities of antioxidant enzymes. **Biologia plantarum**, [s. l.], v. 60, n. 1, p. 123–131, 2016. Disponível em: <http://bp.ueb.cas.cz/doi/10.1007/s10535-015-0559-1.html>. Acesso em: 30 jan. 2026.

LI, L. *et al.* The versatile GABA in plants. **Plant Signaling & Behavior**, [s. l.], v. 16, n. 3, p. 1862565, 2021. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15592324.2020.1862565>. Acesso em: 30 jan. 2026.

LI, D.; SI, J.; REN, X. Coordination and adaptation of water processes in *Populus euphratica* in response to salinity. **Frontiers in Plant Science**, [s. l.], v. 15, p. 1443444, 2024. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2024.1443444/full>.

LI, X.; ZHANG, N. Methionine as a key player in salt stress adaptation in plants. **Plant Physiology**, [s. l.], v. 198, n. 1, p. 169, 2025. Disponível em: <https://academic.oup.com/plphys/article/doi/10.1093/plphys/kiaf169/8129824>. Acesso em: 30 jan. 2026.

LICHTENTHALER, H. K. [34] Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes. In: **Methods in enzymology**. [S. l.]: Elsevier, 1987. v. 148, p. 350–382. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0076687987480361>.

LINDBERG, S.; PREMKUMAR, A. Ion Changes and Signaling under Salt Stress in Wheat and Other Important Crops. **Plants**, [s. l.], v. 13, n. 1, p. 46, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2223-7747/13/1/46>.

LIU, Huifang *et al.* Molecular Mechanism of Exogenous GABA in Regulating Salt Tolerance in Tomato (*Solanum lycopersicum* L.). **International Journal of Molecular Sciences**, [s. l.], v. 26, n. 11, p. 5145, 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1422-0067/26/11/5145>.

LIU, C.; JIANG, X.; YUAN, Z. Plant Responses and Adaptations to Salt Stress: A Review. **Horticulturae**, [s. l.], v. 10, n. 11, p. 1221, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2311-7524/10/11/1221>.

LU, C. *et al.* Salt Stress Inhibits Photosynthesis and Destroys Chloroplast Structure by Downregulating Chloroplast Development-Related Genes in *Robinia pseudoacacia* Seedlings. **Plants**, [s. l.], v. 12, n. 6, p. 1283, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2223-7747/12/6/1283>. Acesso em: 24 fev. 2026.

MA, L. *et al.* Molecular Mechanisms of Plant Responses to Salt Stress. **Frontiers in Plant Science**, [s. l.], v. 13, p. 934877, 2022. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2022.934877/full>.

MA, Y. *et al.* Stomatal and non-stomatal regulations of photosynthesis in response to salinity, and K and Ca fertilization in cotton (*Gossypium hirsutum* L. cv.). **Environmental and Experimental Botany**, [s. l.], v. 230, p. 106092, 2025. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0098847225000097>.

MAKHTOUM, S. *et al.* Genomics and Physiology of Chlorophyll Fluorescence Parameters in *Hordeum vulgare* L. under Drought and Salt Stresses. **Plants**, [s. l.], v. 12, n. 19, p. 3515, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2223-7747/12/19/3515>.

MALEKZADEH, M. R.; ROOSTA, H. R.; KALAJI, H. M. GO nanoparticles mitigate the negative effects of salt and alkalinity stress by enhancing gas exchange and photosynthetic efficiency of strawberry plants. **Scientific Reports**, [s. l.], v. 13, n. 1, p. 8457, 2023. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-023-35725-0>.

MANTOVANI, A. A method to improve leaf succulence quantification. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, [s. l.], v. 42, n. 1, 1999. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-89131999000100002&lng=en&tlng=en. Acesso em: 3 fev. 2026.

MENDONÇA, A. J. T. *et al.* Gas exchange, photosynthetic pigments, and growth of hydroponic okra under salt stress and salicylic acid. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s. l.], v. 27, n. 9, p. 673–681, 2023. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662023000900673&tlng=en.

MILLER, G. L. Use of Dinitrosalicylic Acid Reagent for Determination of Reducing Sugar. **Analytical Chemistry**, [s. l.], v. 31, n. 3, p. 426–428, 1959.

MOHAMED, N. N. I. *et al.* Reducing sugars: a potential factor for onion plant salinity adaptation. **BMC Plant Biology**, [s. l.], v. 25, n. 1, p. 1669, 2025. Disponível em: <https://bmcpplantbiol.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12870-025-07722-0>.

MUBUSHAR, M. *et al.* Assessing the Suitability of Multivariate Analysis for Stress Tolerance Indices, Biomass, and Grain Yield for Detecting Salt Tolerance in Advanced Spring Wheat Lines Irrigated with Saline Water under Field Conditions. **Agronomy**, [s. l.], v. 12, n. 12, p. 3084, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4395/12/12/3084>. Acesso em: 24 fev. 2026.

NAVEGANTES, P. C. A. *et al.* Leaf gas exchange and water relations in two assai cultivars submitted to water-deficit. **Revista Brasileira de Fruticultura**, [s. l.], v. 46, p. e-716, 2024. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-29452024000100303&tlng=en.

NOROUZI, S.; AKBARI, G. Changes in biochemical compositions and salinity tolerance responses of different bread wheat varieties cultivated in an arid and semi-arid climate. **Scientific Reports**, [s. l.], v. 15, n. 1, p. 44914, 2025. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-025-28944-0>.

OBARA, C. E. *et al.* Digestão de tecido vegetal em forno de micro-ondas via sistema aberto. In: JORNADA ACADÊMICA DA EMBRAPA SOJA, 4^a, 2009, LONDRINA. RESUMOS, 2009, Londrina. **Anais [...]**. [S. l.]: EMBRAPA soja, 2009. p. 79–82. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/574698>. Acesso em: 15 fev. 2026.

ORS, S. *et al.* Interactive effects of salinity and drought stress on photosynthetic characteristics and physiology of tomato (*Lycopersicon esculentum* L.) seedlings. **South African Journal of Botany**, [s. l.], v. 137, p. 335–339, 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S025462992031156X>.

PANDIK, K. *et al.* Salinity stress: Impact on plant growth. In: **Advances in food security and sustainability**. [S. l.]: Elsevier, 2024. v. 9, p. 145–160. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2452263524000028>. Acesso em: 2 fev. 2026.

- PANDIT, K. *et al.* Salinity stress: Impact on plant growth. In: **Advances in food security and sustainability**. [S. l.]: Elsevier, 2024. p. 145–160. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2452263524000028>. Acesso em: 24 fev. 2026.
- PEÑA CALZADA, K. *et al.* Exogenous Application of Amino Acids Mitigates the Deleterious Effects of Salt Stress on Soybean Plants. **Agronomy**, [s. l.], v. 12, n. 9, p. 2014, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4395/12/9/2014>.
- PETRÍK, P. *et al.* Leaf physiological and morphological constraints of water-use efficiency in C3 plants. **AoB PLANTS**, [s. l.], v. 15, n. 4, p. plad047, 2023. Disponível em: <https://academic.oup.com/aobpla/article/doi/10.1093/aobpla/plad047/7233794>.
- PUNIRAN-HARTLEY, N. **Understanding the role of compatible solutes in adaptive responses of plants to salinity and waterlogging**. [s. l.], p. 7914906 Bytes, 2024. Disponível em: https://figshare.utas.edu.au/articles/thesis/Understanding_the_role_of_compatible_solute_in_adaptive_responses_of_plants_to_salinity_and_waterlogging/23246987.
- QIAN, Z. *et al.* Gamma-aminobutyric acid (GABA) improves salinity stress tolerance in soybean seedlings by modulating their mineral nutrition, osmolyte contents, and ascorbate-glutathione cycle. **BMC Plant Biology**, [s. l.], v. 24, n. 1, p. 365, 2024. Disponível em: <https://bmcpplantbiol.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12870-024-05023-6>.
- QIU, J. *et al.* Methionine Synthase 2 Represses Stem Cell Maintenance of Arabidopsis thaliana in Response to Salt Stress. **Plants**, [s. l.], v. 13, n. 16, p. 2224, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2223-7747/13/16/2224>.
- R CORE TEAM. **A language and environment for statistical computing**. versão 4.3.2. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2023. Disponível em: <https://www.r-project.org/>. Acesso em: 14 fev. 2026.
- RAVANEL, S. *et al.* Methionine Metabolism in Plants. **Journal of Biological Chemistry**, [s. l.], v. 279, n. 21, p. 22548–22557, 2004. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0021925820668740>.
- RENZETTI, M.; BERTOLINI, E.; TROVATO, M. Proline Metabolism Genes in Transgenic Plants: Meta-Analysis under Drought and Salt Stress. **Plants**, [s. l.], v. 13, n. 14, p. 1913, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2223-7747/13/14/1913>.
- ROOSTA, H. R. *et al.* Supplemental red and blue LED light ameliorate the adverse effect of salinity and alkalinity stress in lettuce plants. **Scientific Reports**, [s. l.], v. 15, n. 1, p. 36449, 2025. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-025-20444-5>.
- ROUPHAEL, Y.; COLLA, G. Editorial: Biostimulants in Agriculture. **Frontiers in Plant Science**, [s. l.], v. 11, p. 40, 2020. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fpls.2020.00040/full>.
- SÁ, F. V. D. S. *et al.* Exogenous application of phytohormones mitigates the effect of salt stress on Carica papaya plants. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s. l.], v. 24, n. 3, p. 170–175, 2020. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662020000300170&tlng=en.
- SAHITO, Z. A.; BENAVIDES-MENDOZA, A.; COTA-RUIZ, K. Editorial: Plant responses to salt stress. **Frontiers in Plant Science**, [s. l.], v. 15, p. 1475599, 2024. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2024.1475599/full>.

- SANTOS, L. F. S. *et al.* Proline on the induction of tolerance of sour passion fruit seedlings to salt stress. **Revista Caatinga**, [s. l.], v. 37, p. e12048, 2024. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1983-21252024000100256&tlng=en. Acesso em: 24 fev. 2026.
- SHAMS, M.; KHADIVI, A. Mechanisms of salinity tolerance and their possible application in the breeding of vegetables. **BMC Plant Biology**, [s. l.], v. 23, n. 1, p. 139, 2023. Disponível em: <https://bmcpplantbiol.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12870-023-04152-8>.
- SHELDEN, M. C.; MUNNS, R. Crop root system plasticity for improved yields in saline soils. **Frontiers in Plant Science**, [s. l.], v. 14, p. 1120583, 2023. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2023.1120583/full>.
- SHETEIWY, M. S. *et al.* GABA-Alleviated Oxidative Injury Induced by Salinity, Osmotic Stress and their Combination by Regulating Cellular and Molecular Signals in Rice. **International Journal of Molecular Sciences**, [s. l.], v. 20, n. 22, p. 5709, 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1422-0067/20/22/5709>.
- SHI, B. *et al.* Methionine-mediated trade-off between plant growth and salt tolerance. **Plant Physiology**, [s. l.], v. 197, n. 3, p. kiaf074, 2025. Disponível em: <https://academic.oup.com/plphys/article/doi/10.1093/plphys/kiaf074/8058651>. Acesso em: 3 fev. 2026.
- SILVA, A. L. J. *et al.* Biostimulant modulate the physiological and biochemical activities, improving agronomic characteristics of bell pepper plants under salt stress. **Scientific Reports**, [s. l.], v. 15, n. 1, p. 14969, 2025. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-025-99414-w>.
- SILVA, F. V. *et al.* Cultivo hidropônico de rúcula utilizando solução nutritiva salina. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias - Brazilian Journal of Agricultural Sciences**, [s. l.], v. 8, n. 3, p. 476–482, 2013. Disponível em: <http://www.agraria.pro.br/ojs32/index.php/RBCA/article/view/v8i3a1689>. Acesso em: 30 jan. 2026.
- SILVA, T. V. E. *et al.* Eruca sativa plants modulate growth and gas exchange when cultivated under salinity stress after leaching fractions. **Journal of Aridland Agriculture**, [s. l.], p. 63–71, 2023. Disponível em: <https://updatepublishing.com/journal/index.php/jaa/article/view/8538>. Acesso em: 23 fev. 2026.
- SINGH, N. *et al.* Salinity stress in crop plants: Effects and eco-friendly management. In: **Advances in food security and sustainability**. [S. l.]: Elsevier, 2024. v. 9, p. 103–143. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2452263524000016>.
- SINGH, A. Soil salinization management for sustainable development: A review. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 277, p. 111383, 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301479720313086>. Acesso em: 23 fev. 2026.
- SOGONI, A. *et al.* Salinity modulates morpho-physiology, biochemical and antioxidant defence system in Tetragonia decumbens Mill.: a neglected wild leafy vegetable in South Africa. **Plant Physiology Reports**, [s. l.], v. 30, n. 1, p. 18–31, 2025. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s40502-024-00811-6>.
- STEIN, É. A.; MINUZZI, R. B. Desempenho agrônômico da rúcula em função da umidade do solo. **Studies in environmental and animal sciences**, [s. l.], v. 6, n. 1, p. e14436, 2025. Disponível em: <https://ojs.studiespublicacoes.com.br/ojs/index.php/seas/article/view/14436>. Acesso em: 23 fev. 2026.
- SU, N. *et al.* GABA operates upstream of H⁺-ATPase and improves salinity tolerance in Arabidopsis by enabling cytosolic K⁺ retention and Na⁺ exclusion. **Journal of Experimental Botany**, [s. l.], v. 70, n. 21, p. 6349–6361, 2019. Disponível em: <https://academic.oup.com/jxb/article/70/21/6349/5550905>.

SUÁREZ-SALAZAR, J. C. *et al.* Photosynthetic responses and protective mechanisms under prolonged drought stress in cocoa. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [s. l.], v. 59, p. e03543, 2024. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-204X2024000103700&tlng=en.

SULEIMAN, M. K. *et al.* Effects of Salt Stress on Growth, Proline and Mineral Content in Native Desert Species. **Sustainability**, [s. l.], v. 15, n. 7, p. 6232, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/7/6232>.

SUN, X. *et al.* Effects of salinity stress on morphological structure, physiology, and mRNA expression in different wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars. **Frontiers in Genetics**, [s. l.], v. 16, p. 1535610, 2025. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fgene.2025.1535610/full>.

TABSSUM, F. *et al.* Exogenous Application of Proline Improved Salt Tolerance in Rice through Modulation of Antioxidant Activities. **Pakistan Journal of Agricultural Research**, [s. l.], v. 32, n. 1, 2019. Disponível em: <http://researcherslinks.com/current-issues/Exogenous-Application-of-Proline-Improved-Salt-Tolerance-in-Rice-through-Modulation-of-Antioxidant-Activities/24/1/1984/html>.

TAIZ, L. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. Tradução de Júlio César de Lima; Paulo Luiz de Oliveira. 7. ed. Porto Alegre, RS: Artmed, 2024.

TORRES, M. B. *et al.* Growth and physiological aspects of arugula subjected to soil salinity and fertilizer doses. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 37, p. e12382, 2024. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1983-21252024000100283&tlng=en. Acesso em: 13 jan. 2026.

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**, [s. l.], v. 13, p. 1081188, 2023. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2022.1081188/full>.

VAN ZELM, E.; ZHANG, Y.; TESTERINK, C. Salt Tolerance Mechanisms of Plants. **Annual Review of Plant Biology**, [s. l.], v. 71, n. 1, p. 403–433, 2020. Disponível em: <https://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev-arplant-050718-100005>. Acesso em: 2 fev. 2026.

WANG, X. *et al.* Diffusional conductance to CO₂ is the key limitation to photosynthesis in salt-stressed leaves of rice (*ORYZA SATIVA*). **Physiologia Plantarum**, [s. l.], v. 163, n. 1, p. 45–58, 2018. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/ppl.12653>. Acesso em: 24 fev. 2026.

WANG, J. *et al.* Gamma-Aminobutyric Acid: A Novel Biomolecule to Improve Plant Resistance and Fruit Quality. **Plants**, [s. l.], v. 14, n. 14, p. 2162, 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2223-7747/14/14/2162>.

WANG, Y. *et al.* γ -Aminobutyric Acid Imparts Partial Protection from Salt Stress Injury to Maize Seedlings by Improving Photosynthesis and Upregulating Osmoprotectants and Antioxidants. **Scientific Reports**, [s. l.], v. 7, n. 1, p. 43609, 2017. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/srep43609>.

WITKOWSKI, E. T. F.; LAMONT, B. B. Leaf specific mass confounds leaf density and thickness. **Oecologia**, [s. l.], v. 88, n. 4, p. 486–493, 1991. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/BF00317710>.

WU, X. *et al.* Gamma-aminobutyric acid (GABA) alleviates salt damage in tomato by modulating Na⁺ uptake, the GAD gene, amino acid synthesis and reactive oxygen species metabolism. **BMC Plant Biology**, [s. l.], v. 20, n. 1, p. 465, 2020. Disponível em: <https://bmcpplantbiol.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12870-020-02669-w>. Acesso em: 30 jan. 2026.

- YAN, S.; CHONG, P.; ZHAO, M. Effect of salt stress on the photosynthetic characteristics and endogenous hormones, and: A comprehensive evaluation of salt tolerance in *Reaumuria soongorica* seedlings. **Plant Signaling & Behavior**, [s. l.], v. 17, n. 1, p. 2031782, 2022. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15592324.2022.2031782>. Acesso em: 24 fev. 2026.
- YAO, X.-C. *et al.* Changes in the morphology traits, anatomical structure of the leaves and transcriptome in *Lycium barbarum* L. under salt stress. **Frontiers in Plant Science**, [s. l.], v. 14, p. 1090366, 2023. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2023.1090366/full>.
- YEMM, E. W.; WILLIS, A. J. The estimation of carbohydrates in plant extracts by anthrone. **Biochemical Journal**, [s. l.], v. 57, n. 3, p. 508–514, 1954. Disponível em: <https://portlandpress.com/biochemj/article/57/3/508/48750/The-estimation-of-carbohydrates-in-plant-extracts>.
- YOUNIS, A. A.; MANSOUR, M. M. F. Hydrogen sulfide-mitigated salinity stress impact in sunflower seedlings was associated with improved photosynthesis performance and osmoregulation. **BMC Plant Biology**, [s. l.], v. 24, n. 1, p. 422, 2024. Disponível em: <https://bmcpantbiol.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12870-024-05071-y>.
- YOUSAF, M. *et al.* Exogenous gamma amino butyric acid (GABA) enhanced salinity tolerance in wheat by modulating morphological and anatomical traits. **Scientific Reports**, [s. l.], v. 15, n. 1, p. 36998, 2025. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-025-93904-7>.
- YU, X. *et al.* Soil and water management to prevent salinization under changing climate conditions. **Agricultural Water Management**, [s. l.], v. 322, p. 110002, 2025. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378377425007164>.
- YUAN, D. *et al.* GABA Metabolism, Transport and Their Roles and Mechanisms in the Regulation of Abiotic Stress (Hypoxia, Salt, Drought) Resistance in Plants. **Metabolites**, [s. l.], v. 13, n. 3, p. 347, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2218-1989/13/3/347>.
- ZAHRA, N. *et al.* Regulation of photosynthesis under salt stress and associated tolerance mechanisms. **Plant Physiology and Biochemistry**, [s. l.], v. 178, p. 55–69, 2022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0981942822001097>.
- ZARBAKSH, S.; SHAHSAVAR, A. R. Exogenous γ -aminobutyric acid improves the photosynthesis efficiency, soluble sugar contents, and mineral nutrients in pomegranate plants exposed to drought, salinity, and drought-salinity stresses. **BMC Plant Biology**, [s. l.], v. 23, n. 1, p. 543, 2023. Disponível em: <https://bmcpantbiol.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12870-023-04568-2>.
- ZHANG, Z. *et al.* Metabolomic remodeling and genetic regulation in potato tubers during domestication. **Molecular Plant**, [s. l.], v. 19, n. 2, p. 328–345, 2026. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1674205225004356>.
- ZHANG, Yunting *et al.* Physiological and transcriptomic evidence revealed the role of exogenous GABA in enhancing salt tolerance in strawberry seedlings. **BMC Genomics**, [s. l.], v. 26, n. 1, p. 196, 2025. Disponível em: <https://bmccgenomics.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12864-025-11368-5>. Acesso em: 4 fev. 2026.
- ZUO, G. *et al.* Photosynthetic mechanisms underlying NaCl-induced salinity tolerance in rice (*Oryza sativa*). **BMC Plant Biology**, [s. l.], v. 24, n. 1, p. 41, 2024. Disponível em: <https://bmcpantbiol.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12870-024-04723-3>.